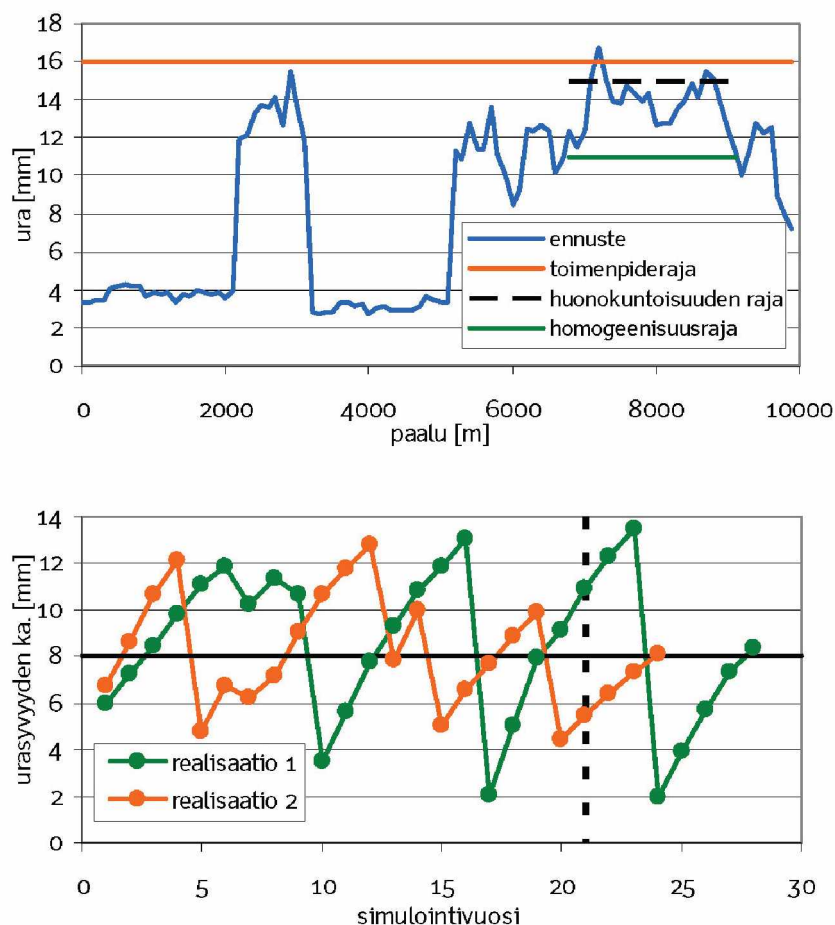


JANNE JUNES

Tiepäällysteiden ylläpitostrategioiden vertailu simulointimallilla



Janne Junes

Tiepäälysteiden ylläpitostrategioiden vertailu simulointimallilla

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 33/2011

Liikennevirasto
Helsinki 2011

Kannen kuvat: Janne Junes

Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6648

ISBN 978-952-255-690-5

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 020 637 373

Janne Junes: Tiepäälysteiden ylläpitostrategioiden vertailu simulointimallilla. Liikennevirasto, väylänpito-osasto. Helsinki 2011. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 33/2011. 79 sivua. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-690-5.

Avainsanat: mallintaminen, simulointi, ylläpitostrategia, tiepäälysteet, urautuminen

Tiivistelmä

Kasvat liikennemäärät yhdistyneenä tienpidon vähentyneeseen rahoitukseen pakottavat soveltamaan uusia strategioita tiepäälysteiden ylläpitoon. Tässä työssä tutkitaan tiepäälysteiden ylläpitostrategioita matemaattisen mallintamisen keinoin. Mallinnuksen kohteena ovat vilkkaasti liikennöidyt tiet, joilla päälysteen uusimistarpeen aiheuttaa urautuminen eli ajourien syntyminen päälysteeseen. Urautuminen johtuu pääosin nastarenkaiden aiheuttamasta kulumisesta, ja se on epähomogeeninen ilmiö, eli urasyvyys saattaa vaihdella voimakkaasti jopa samaan aikaan päälystetyn ja yhtä vilkkaasti liikennöidyn tieosuuden sisällä.

Tässä työssä vertaillaan vilkkaasti liikennöidyn tieverkon päälystysstrategioiden vaikutuksia. Eräs strategia on väliaikaispaikkaus, jolla tarkoitetaan pahimmin urautuneiden kohtien urien paikkaamista odottamaan varsinaista uudelleenpäälystystä. Toinen strategia on toimenpiderajojen nostaminen, jolloin tiellä sallitaan syvemmät urat ennen uudelleenpäälystystä. Molemmissa on tavoitteena ylläpitokustannusten pienentäminen päälysteen uusimista lykkäämällä.

Päälysteiden ylläpitostrategioiden tutkimiseen sovelletaan uutta lähestymistapaa. Työssä rakennetaan simulointimalli, joka mallintaa urautuvan tien päälysteen ylläpitoa. Mallilla strategioita voidaan vertailla keskenään toteuttamatta toimenpiteitä todellisille teille. Simulointimallia varten kehitetään urauttamismalli, joka tuottaa todennukaisia, epähomogeenisia uraprofiileja. Ylläpitostrategiat muokataan urasyvyyttä koskeviksi suoraviivaisiksi päätössäännöiksi, joiden perusteella malli valitsee päälystyskohteet. Simulointimalliin toteutetaan lopetusehdoksi kuntokriteeri, joka lopettaa simuloinnin määrättyyn keskimääräiseen urasyvyyteen. Kuntokriteerin avulla saadaan vertailukelpoisempaa tietoa strategioiden vuosikustannuksista kuin kiinteää simulointiaikaa käyttämällä. Strategioita vertaillaan keskenään simulointitulosten pohjalta, jolloin saadaan uutta monipuolista tietoa niiden vaikutuksista.

Työ tuottaa uusia menetelmiä ja työkaluja infrastruktuurin ylläpidon mallinnukseen sekä uutta tietoa strategioiden vaikutuksista ylläpitokustannuksiin ja tiestön tilaan. Simulointitulosten perusteella voidaan todeta, että lisäämällä päälystyskohteiden keskimääräistä urasyvyyttä yhdellä millimetrillä voidaan saavuttaa keskimäärin noin 10 prosentin säästöt ylläpitokustannuksiin. Väliaikaispaikkauksella on mahdollista säästää noin 15 prosenttia, ja yhdistämällä väliaikaispaikkaus ja päälystyskohteiden urasyvyyden lisäys voidaan saada noin 20 prosentin säästöt. Haittapuolena on tienkäyttäjän kokeman palvelutason heikkeneminen paikkojen ja urasyvyyden kasvun myötä. Työn tuloksia voidaan hyödyntää toimintalinjojen päivittämisessä Liikennevirastossa, ja sitä kautta ne tukevat myös päälystysohjelmointia elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksissa.

Janne Junes: Jämförelse av strategier för underhåll av vägbeläggningar med simuleringsmodell. Trafikverket, trafikledshållning. Helsingfors 2011. Trafikverkets undersökningar och utredningar 33/2011. 79 sidor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-690-5.

Nyckelord: modellering, simulering, underhållsstrategi, vägbeläggningar, spårbildning

Sammandrag

De ökande trafikvolymerna i kombination med minskade anslag till väghållningen gör det nödvändigt att tillämpa nya strategier för underhållet av vägbeläggningarna. Detta är en undersökning av strategierna för underhållet av vägbeläggningar med hjälp av matematisk modellering. Objektet för modelleringen är livligt trafikerade vägar där behovet av förnyad beläggning orsakar spårbildning, dvs. trafiken ger upphov till spår i vägbeläggningen. Spårbildningen beror främst på den nötning som dubbdäcken orsakar och detta är inte ett homogent fenomen, dvs. spårdjupet kan variera kraftigt inom en vägsträcka som har belagts samtidigt och är lika kraftigt trafikerade.

I undersökningen jämförs effekterna av olika belägningsstrategier för ett starkt trafikerat vägnät. En strategi är att utföra en temporär reparation, dvs. reparationer av de platser där spårbildningen är som värst, i väntan på en helt ny beläggning. En annan strategi är att höja åtgärdsgränserna och tillåta djupare spår före utförandet av ny beläggning. Målsättningen för båda strategierna är att sänka underhållskostnaderna genom att senarelägga en ny beläggning.

Ett nytt angreppssätt tillämpas vid undersökningen av strategierna för underhållet av beläggningarna. Simuleringsmodeller skapas för modellering av belägningsunderhållet på en väg med spårbildning. Modellen kan användas för att jämföra olika strategier utan att genomföra åtgärderna på faktiska vägar. För tillämpning i simuleringsmodellen utvecklas en spårbildningsmodell som producerar verklighetstroga spårprofiler som inte är homogena. Underhållsstrategierna modifieras till rätlinjiga beslutsregler för spårdjupet. Modellen väljer belägningsobjekten enligt dessa regler. Som slutvillkor för simuleringsmodellen tillämpas ett konditionskriterium som avslutar simuleringen vid ett bestämt genomsnittligt spårdjup. Med hjälp av konditionskriteriet får man data med bättre jämförbarhet mellan strategiernas årskostnader än genom att använda en fast simuleringstid. De olika strategierna jämförs utifrån simuleringsresultaten. Då får man ny mångsidig information om strategiernas effekter.

Undersökningen skapar nya metoder och verktyg för modellering av infrastruktur samt ny information om strategiernas effekter på underhållskostnaderna och vägsystemets tillstånd. Simuleringsresultaten visar att cirka 10 procents besparingar i underhållskostnaderna kan uppnås om det genomsnittliga spårdjupet hos beläggningarna får öka med en millimeter. Med temporära reparationer är det möjligt att spara cirka 15 procent och genom att kombinera temporära reparationer med en ökning av belägningsobjektens spårdjup uppnås cirka 20 procents besparingar. Nackdelen är att vägtrafikanterna upplever fler belägningslappar och ökat spårdjup som försämrar servicenivå. Undersökningsresultaten kan utnyttjas för uppdatering av verksamhetslinjerna inom Trafikverket och därigenom även utgöra ett stöd för belägningsprogrammeringen vid närings-, trafik- och miljöcentralerna.

Janne Junes: Comparing road pavement maintenance strategies using simulation model. Finnish Transport Agency, Infrastructure Operations and Maintenance. Helsinki 2011. Research reports of the Finnish Transport Agency 33/2011. 79 pages. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-690-5.

Keywords: modeling, simulation, maintenance strategy, road pavements, rutting

Summary

Increasing traffic volume and decreasing maintenance budget force road agencies to develop new strategies for the road maintenance. This thesis studies road pavement maintenance strategies by mathematical modeling. Modeling focuses on high traffic volume main roads where pavement rutting is the main reason for resurfacing. Rutting is an inhomogeneous phenomenon, so that rut depth may vary considerably within a road section even if the age of the pavement and traffic volume were the same.

This thesis compares road pavement maintenance strategies on high traffic volume roads. One strategy is patching which means that worst rutted spots are patched to wait for the actual resurfacing. Another strategy is to increase maximum rut depth allowed on the roads. The aim is to decrease the maintenance cost by delaying the actual resurfacing.

This thesis develops a new approach to the research of road pavement maintenance strategies. A simulation model is built to model rutting and pavement maintenance. Strategies are compared using the model without field tests on roads. A rutting model to produce realistic inhomogeneous rut depth profiles is developed for the simulation model. The strategies are converted to decision rules related to rut depth. The simulation model executes maintenance to a virtual road based on the decision rules. The model features a new condition-based criterion to stop the simulation run. This new criterion helps to provide more comparable information about the annual maintenance costs of different strategies than using a fixed number of simulation years. Strategies are compared based on the results from the simulation model which gives an extensive amount of information about the effects of different strategies.

New methods and tools as well as new information about the effects of different strategies to the maintenance costs and pavement condition are obtained as the result of this thesis. Increasing the average rut depth of resurfacing sites by one millimeter generates average savings of about 10 percent in annual maintenance cost. About 15 percentage savings are reached by patching. Combination of patching and increased average rut depth generates about 20 percent savings. A disadvantage is that the service level experienced by road user decreases due to patches and increased rut depth. The results of this thesis can be used by the Finnish Transport Agency to update the maintenance policy and by road districts to support maintenance programming.

Esipuhe

Kasvavat liikennemäärät yhdistyneenä tienpidon vähentyneeseen rahoitukseen pakottavat soveltamaan uusia strategioita tiepäälysteiden ylläpitoon. Tässä työssä ylläpitostrategioita tutkitaan matemaattisen mallintamisen keinoin. Matemaattisella mallintamisella vältetään kenttäkokeiden tekeminen strategioiden vertailemiseksi, mutta mallintamisella on itsessäänkin arvoa; se voi auttaa ymmärtämään tutkittavaa ilmiötä aikaisempaa syvällisemmin.

Tutkimuksen tuloksena selvisi, että verrattain pienillä toimintalinjojen muutoksilla, kuten pienellä toimenpiderajan nostolla ja urien väliaikaispaikkauksella, on saavutettavissa merkittäviä säästöjä päälysteiden ylläpitokustannuksiin.

Tämän tutkimuksen on tehnyt diplomityönään Aalto-yliopiston perustieteiden korkeakoulun opiskelija, tekniikan kandidaatti Janne Junes. Hänen pääaineensa on systeemi- ja operaatiotutkimus. Työ on tehty Pöyry CM Oy:n infraomaisuuden hallinta-yksikössä

Työn valvoja on professori Ahti Salo Aalto-yliopiston perustieteiden korkeakoulun systeemianalyysin laboratoriosta ja ohjaaja TkL Pekka Mild Pöyry CM Oy:stä. Liikennevirastossa työtä on ohjannut FM Vesa Männistö väylänpidon suunnittelusta. Ins. Harri Spoof Pöyry CM Oy:stä on tukenut työtä päälysteiden ylläpidon asiantuntijana.

Helsingissä kesäkuussa 2011

Liikennevirasto

Väyläpito-osasto / Väylänpidon suunnittelu

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	9
2	TAUSTA JA TEORIA	12
2.1	Päällysteen urautuminen	12
2.2	Asfalttityypit ja päällystysmenetelmät	14
2.2.1	Asfalttityypit	14
2.2.2	Päällystysmenetelmät	14
2.3	ARMA-mallit	15
2.3.1	ARMA-mallien yhtälöt	15
2.3.2	Boxin ja Jenkinsin menetelmä	17
3	URAUTTAMISMALLI	20
3.1	Urauttamismallin periaate	20
3.2	Ennustemalli	22
3.3	Lähtöprofiilimalli	26
3.3.1	AR-mallin identifiointi	27
3.3.2	AR-mallin parametrien estimointi	28
3.3.3	AR-mallin diagnostiset tarkistukset	29
3.3.4	Minimiurasyvyyskorjaus	30
3.3.5	Esimerkkejä lähtöprofiilimallin toiminnasta	30
3.3.6	Kahden vuoden ikäisen päällysteen urasyvyuden odotusarvo	32
3.4	Urauttamismalli kokonaisuutena	34
3.5	Urauttamismallin verifiointi	36
3.5.1	Vertailu todellisiin uraprofiileihin	36
3.5.2	Kiertoajat ja peittoprosentit	41
4	SIMULOINTIMALLI	45
4.1	Simulointimallin perusrakenne	45
4.2	Simulointimallin tekninen toteutus	47
4.3	Lopetusehto	47
4.3.1	Kiinteä simulointiaika	47
4.3.2	Kuntokriteeri	49
4.3.3	Ylläpitokustannusten määrittäminen	50
4.4	Toimenpiteet ja toimenpidekierrot	51
4.5	Parametrit	52
4.5.1	Lähtötila	52
4.5.2	Toimenpidehinnat	53
4.5.3	Muuteltavat parametrit	55
4.6	Mallilla tuotettavat tulokset	55
4.6.1	Perustulokset	56
4.6.2	Yksityiskohtaiset tulokset ja yksittäisen iteraation tarkastelu	56
5	YLLÄPITOSTRATEGIOIDEN SIMULOINTI	58
5.1	Strategiat	58
5.1.1	Pelkkä uudelleenpäällystystoimenpide	58
5.1.2	Väliaikaispaikkaus	60
5.1.3	Näkökohtia strategioista	61
5.2	Simulointitulokset generoidulla lähtötilalla	63
5.2.1	Homogeenisemmin urautuva tie	63
5.2.2	Hyvin epähomogeenisesti urautuva tie	67

5.2.3	Liikennemäärän vaikutus tuloksiin	68
5.3	Osuus valtatieltä 25.....	70
5.3.1	Tutkittava osuus	70
5.3.2	Simulointitulokset.....	71
5.4	Herkkyysanalyysit.....	73
6	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	76
	LÄHDELUETTELO	78

1 Johdanto

Suomessa tavara- ja henkilöliikenteestä valtaosa on tieliikennettä, josta edelleen valtaosa on maantieliikennettä. Viimeisten 25 vuoden aikana maanteiden liikennesuorite on kasvanut noin 65 prosenttia. Tienpidon vuosittainen rahoitus on puolestaan vähentynyt noin 30 prosenttia (Heiniö, 2010). Rahoituksen vähentyessä maanteitä ei pystytäkään päällystämään uudelleen yhtä usein kuin aiemmin, mutta liikennemäärän kasvaessa päällysteet kuluvat yhä nopeammin. Tarpeeseen nähden liian pieni rahoitus pakottaa soveltamaan uusia strategioita päällysteiden ylläpitoon.

Vilkkaasti liikennöidyllä tieverkolla uudelleenpäällystystarpeen aiheuttaa lähes aina ajourien syntyminen päällysteeseen. Urautuminen johtuu pääosin nastarenkaiden aiheuttamasta kulumisesta (Lampinen, 1993). Urautuminen on epähomogeeninen ilmiö, eli urasyvyys vaihtelee voimakkaasti jopa samalla kerralla päällystetyn ja yhtä vilkkaasti liikennöidyn tieosuuden sisällä.

Eräs strategia uudelleenpäällystysten lykkäämiseen on väliaikaispaikkaus, jolla tarkoitetaan pahimmin urautuneiden kohtien paikkaamista odottamaan varsinaista päällystystoimenpidettä. Toinen strategia on toimenpiderajojen nosto, jolloin tiellä sallitaan syvemmät urat ennen uudelleenpäällystystä. Nämä kaksi strategiaa voidaan myös yhdistää. Molemmilla tavoilla uudelleenpäällystystä saadaan lykättyä, ja ylläpitokustannukset pienenevät. Toisaalta tienkäyttäjän kokemana palvelutaso huononee, kun tie pääsee huonompaan kuntoon ennen uudelleenpäällystystä.

Erilaisia ylläpitostrategioita voidaan vertailla matemaattisella mallintamisella toteuttamatta niitä todelliselle tielle. Todellisilla tieosuuksilla tehtävä tutkimus olisi vaikea toteuttaa. Päällysteen kestoikä on sen verran pitkä, että vertailukelpoisten tulosten saaminen kestäisi vuosia, ellei vuosikymmeniä. Toiseksi, koska samaan kohtaan ei voida soveltaa kuin yhtä strategiaa, täytyisi tutkimukseen löytää mahdollisimman identtisiä vertailupareja. Urautuminen on niin epähomogeenista, että näitä vertailupareja täytyisi olla melko paljon, jotta tulokset olisivat luotettavia. Näistä syistä matemaattinen mallintaminen on perusteltu tapa päällystysstrategioiden vertailuun.

Yleisemmin tässä työssä on kyse elinkaarimallinnuksesta, jossa kohde rappeutuu heterogeenisesti. Klassinen esimerkki elinkaarimallista on teollisuuskone, jonka osia uusitaan tai korjataan tai laite voidaan vaihtaa kokonaan uuteen. Tämän työn mallintamisongelma eroaa teollisuuslaitteista muun muassa siinä, että teollisuuskone tyypillisesti joko toimii tai sitten se on epäkunnossa, jolloin tuotanto keskeytyy. Tiepäällysteiden tapauksessa kysymys on liikenteen sujuvuudesta ja turvallisuudesta, mutta päällyste ei yhtäkkiä hajoa siten, että hajoaminen katkaisisi liikenteen. Toinen ero on se, että päällystyskohteet voidaan valita vapaammin kuin uusittavat teollisuuslaitteen osat. Esimerkiksi 20 kilometriä pitkstä tiestä voidaan päällystää vaikkapa pahemmin urautunut osuus ensin ja loput kahden vuoden päästä. Teollisuuskoneen tapauksessa taas laitteen rakenne määrää usein sen, mitkä osat on mielekästä vaihtaa samalla kertaa.

Tässä työssä tutkitaan vilkkaasti liikennöidyn tieverkon päällystysstrategioita, jolloin uudelleenpäällystystarpeen aiheuttaa päällysteen urautuminen. Lähtökohtaisena tavoitteena on päällysteen ylläpitokustannusten pienentäminen.

Tutkimuksen tavoitteena on arvioida:

- Millaisia kustannussäästöjä voidaan saavuttaa toimenpiderajoja nostamalla ja/tai väliaikaispaikkausta käyttämällä?
- Miten toimenpiderajojen nostaminen ja väliaikaispaikkaus vaikuttavat päällysteen kuntoon?

Kysymyksiä lähestytään matemaattisen mallintamisen keinoin. Työssä rakennettava malli perustuu Monte Carlo -simulointiin. Mallilla voidaan vertailla päällysteiden ylläpitostrategioita ja tutkia erilaisia toimenpiderajoja myös todellisten tieosuuksien pohjalta.

Strategioiden soveltamisen kannalta ei ole keskeistä, mitkä fysikaaliset mekanismit aiheuttavat päällysteen urautumisen ja johtavat eroihin urautumisnopeudessa. Siksi työssä ei mallinneta urautumismekanismeja tie- tai materiaalitekniikan pohjalta. Strategioiden vertailemiseksi riittää tuottaa todellisuutta jäljitteleviä tien pituussuuntaisia uraprofiileja, joihin sovelletaan valittuja strategioita. Strategiat implementoidaan malliin suoraviivaisina päätössääntöinä.

Tutkimuksen tavoitteisiin päästään seuraavasti:

- rakennetaan epähomogeenista uraprofiilia tuottava urauttamismalli
- toteutetaan urauttamismallia hyödyntävä päällystysstrategioiden simulointimalli
- vertaillaan erilaisia päällystysstrategioita ja toimenpiderajoja simulointimallilla.

Urauttamismalli mallintaa tien epähomogeenista urautumista, ja siinä hyödynnetään autoregressiivistä mallia eli AR-mallia. Urauttamismalli implementoidaan simulointimalliin, joka toteuttaa urauttamismallin tuottamalle uraprofiilille toimenpiteitä valitun strategian mukaisesti. Strategia mallinnetaan simulointimalliin suoraviivaisina päätössääntöinä, jotka koskevat päällysteen sallittua urasyvyyttä sekä väliaikaispaikkauksen käyttöä. Simuloinnin tuloksena saadaan tietoa muun muassa ylläpitokustannuksista, päällystyskohteiden pituuksista, urasyvyyksistä sekä saumojen määristä valitulla strategialla. Saumalla tarkoitetaan vanhemman ja uudemman päällysteen välistä rajakohtaa. Strategioita vertaillaan keskenään simulointitulosten pohjalta, jolloin saadaan uutta tietoa strategioiden vaikutuksista ylläpitokustannuksiin ja tiestön tilaan.

Malli rajautuu vilkasliikenteisiin teihin, jolloin keskimääräisen vuorokausiliikenteen (KVL) oletetaan olevan yli 3 000 ajoneuvoa vuorokaudessa. Mallissa tutkittava tie on tavallinen yksiajoratainen ja kaksikaistainen tie. Malli soveltuu siis vilkasliikenteisille teille useampijorataisia teitä lukuun ottamatta. Tällaisia vilkasliikenteisiä ja yksiajorataisia teitä ovat useimmat valtatie sekä suurin osa Etelä-Suomen kantateistä. Mallin antamia tuloksia voi kuitenkin todennäköisesti soveltaa myös useampikaistaisille tai useampijorataisille teille.

Tämän työn lähestymistapaa voinee soveltaa myös muunlaisen infrastruktuurin ylläpitostrategioiden tutkimiseen. Yleisemmin lähestymistapa koostuu seuraavista vaiheista: Aluksi mallinnetaan rappeutuvan infrastruktuurin käyttäytyminen ajan funktiona ja muokataan tutkittavat ylläpitostrategiat suoraviivaisiksi päätössäännöiksi. Seuraavaksi simuloidaan päätössääntöjen soveltamista rappeutuvan infrastruktuurin ylläpitoon ja lopuksi strategioita vertaillaan simuloinnin tulosten pohjalta.

Työn tulokset tukevat päällystettyjen teiden ylläpitostrategioiden kehittämistä ja toimintalinjatyötä. Kohderyhmänä on ensisijaisesti ylläpidon ohjaus Liikennevirastossa ja edelleen päällystysohjelmointi elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksissa (ELY). Työssä käsiteltävät ja kehitettävät mallit tukevat verkkotason ohjausta ylläpitokustannusten pienentämiseksi. Lisäksi työssä käytettävä lähestymistapa sekä työssä kehitetyt menetelmät ovat hyödyllisiä myös muunlaisen infrastruktuurin ylläpitostrategioiden mallintamisessa.

Liikenneviraston hallinnoiman päällystetyn tieverkon ylläpitoon käytetään vuosittain noin 130–150 miljoonaa euroa (Liikennevirasto, 2010). Urautuvan tieverkon osuus on noin puolet tästä, eli työn tulokset koskettavat kymmenien miljoonien eurojen vuosikustannuksia.

Työn rakenne on seuraava: Luvussa 2 esitellään lyhyesti urautumisen syitä, työn kannalta oleelliset asfalttityypit ja päällystysmenetelmät sekä ARMA-mallien teoriaa. Luvussa 3 esitellään työn urauttamismalli sekä sen toimintaa ja verifiointia. Luvussa 4 kuvataan varsinaisen simulointimallin toimintaa. Luvussa 5 esitetään simuloinnin tulokset ja arvioidaan niitä. Lopuksi esitetään yhteenveto.

2 Tausta ja teoria

2.1 Päällysteen urautuminen

Päällystettyjen teiden kuntoa seurataan säännöllisin kuntomittauksin. Uudelleenpäällystystarpeen aiheuttaa useimmiten päällysteen urautuneisuus, epätasaisuus tai vaurioituneisuus. Urautumisella tarkoitetaan päällysteeseen syntyviä ajouria. Liian syvät urat aiheuttavat turvallisuusriskin, kun niihin kerääntyy sateella vettä. Urat vaikuttavat myös ajoneuvon ohjaukseen, mikä aiheuttaa riskejä sekä heikentää ajomukavuutta. Tärkein urautumista aiheuttava syy on nastarenkaiden aiheuttama päällysteen kuluminen, ja mitä enemmän tiellä on liikennettä, sitä nopeampaa kuluminen on (Lampinen, 1993).

Urasyvyyden mittayksikkö on millimetri, ja sitä mitataan mittausautolla ajamalla mitattava osuus läpi. Mitatuista poikkiprofiileista lasketaan maksimiurien keskiarvo, joka on käytettävä tunnusluku. Tunnusluku kuvaa siis tien poikittaista epätasaisuutta (Tiehallinto, 57/2005). Aineistoa käsitellään sadan metrin tarkkuudella, eli jokaista satametristä kuvaa yksi urasyvyydluku.

Satametrisen on sadan metrin pituinen jakso ajorataa. Tieosan viimeinen satametrisen voi olla vajaa eli pituudeltaan alle sata metriä. Tieosan viimeisen satametrisen pituus määräytyy niin, että se päättyy tieosan loppuun.

Edes samalla kerralla päällystetty ja liikenteeltään yhtä vilkas tien osuus ei yleensä uraudu homogeenisesti. Uraltaan syvimmet kohdat voivat olla siellä täällä, ja niiden välissä voi olla melko matalauraista päällystettä. Urasyvyyteen vaikuttavat useat syyt. Samalla kertaa päällystetyn ja yhtä vilkkaasti liikennöidyn osuuden sisällä urasyvyyden vaihtelua aiheuttavat muun muassa:

- **Ajonopeus:** Keskimääräiseen ajonopeuteen vaikuttaa lähinnä nopeusrajoitus, mutta myös mäet ja kaarteet vaikuttavat siihen.
- **Kiihdytykset ja jarrutukset:** Näitä tapahtuu mm. nopeusrajoituksen vaihtuessa sekä liittymien kohdalla, kun tieltä poistutaan tai tielle liitytään.
- **Ajolinjat:** Mitä tarkemmin autot ajavat samasta kohdasta tien leveyssuunnassa, sitä nopeammin tie urautuu. Ajolinjoihin vaikuttavat mm. kaarteet, kaiteet, keskikorokkeet ja tien leveys.
- **Laadunvaihtelu päällysteessä:** Tämä voi johtua esimerkiksi vaihtelusta asfalttimassan, levityksen tai jyräyksen laadussa tai sääolosuhteiden vaihtelusta työn aikana. Huonompi päällyste voi kulua nopeammin, tai se voi siirtyä sivuille ajourien kohdalta eli deformatuuta. Huonosti jyrätty päällyste tiivistyy enemmän kuin huolellisemmin jyrätty.
- **Laadunvaihtelu pohjarakenteissa:** Puutteelliset pohjarakenteet antavat periksi ajourien kohdalta, mitä kutsutaan tierakenteen deformaatioksi.

Kohtalaisen vilkasliikenteisillä teillä päällystystarpeen laukaisee useimmiten urautuneisuus, ja hyvin vilkasliikenteisillä teillä urautuneisuus on käytännössä aina päällystystarpeen aiheuttava syy. Tavoitteena on, että päällystystoimenpiteet kohdistuisivat huonokuntoisille osuuksille, eli sinne missä urasyvyys ylittää huonokuntoisuudelle asetetun rajan tai päällyste on muusta syystä luokiteltu huonokuntoiseksi. Koska

päällystyslaitteiston siirtäminen on kallista ja päällystäminen aiheuttaa haittaa liikenteelle, päällystetään yleensä samalla kertaa pidempi osuus, jolla kaikki päällystyskohteen pituudesta kutsutaan peittoprosentiksi. Yhtenä tutkittavien päällystysstrategioiden tavoitteena on peittoprosentin nostaminen. Kiertoajalla tarkoitetaan päällystyskertojen välistä aikaa. Päällysteen rappeutumisnopeutta kuvataan usein kiertoajan ja peittoprosentin muodostamalla parilla.

Se, että nastarenkaiden aiheuttama urautuminen aiheuttaa lähes poikkeuksetta tien uudelleenpäällystystarpeen, on maailman mittakaavassa poikkeuksellista. Siispä samanlaista lähestymistapaa kuin tässä työssä ei löydy kirjallisuudesta. Urautuminen aiheutuu lähes kaikkialla maailmassa pääosin päällysteen tai pohjarakenteiden deformaatiosta. Deformaation aiheuttaman urautumisen ennustamiseen on kehitetty malleja sekä päällysteen mekaniikan teorian pohjalta että kokeellisesti. (Kts. esim. Yang ym., 2009 tai Archilla ja Madanat, 1999.) Urasyvyyden keskiarvon ennustamiseen ilman mittausdataa on kehitetty myös kotimainen nastarengaskulutuksen huomioiva malli (Tiehallinto, 40/2005).

Alku-uralla tarkoitetaan uuteen päällysteeseen muutaman viikon tai kuukauden aikana syntyvää poikittaista epätasaisuutta, joka ei johdu päällysteen kulumisesta. Sauli Suonio on tutkinut alku-urautumista diplomityössään Asfalttipäällysteiden alku-urautuminen (Suonio, 2011). Työssä todettiin, että huomattava osa mitatuista alku-urasyvyyksistä johtuu päällysteen karkeudesta ja epätasaisuudesta, eli päällysteen jälkitiivistyminen ei ole ainoa alku-urien mittauksissa näkyvä seikka.

Myös päällystystyön optimaalista ajoittamista ylläpitokustannusten minimoimiseksi on tutkittu paljon. Näissä tutkimuksissa yleensä ajatellaan, että sama osuus päällystetään aina kokonaisuudessaan. (Kts. esim. Li ja Madanat, 2002; Oyang ja Madanat, 2004 tai Chootinan ym., 2006.) Myös päällystysohjelman optimointia verkkotasolla on tutkittu, katso esim. Fwa ym. (2000).

Tien epähomogeeninen urautuminen on hyvin monimutkainen prosessi, jonka tarkka, tien ominaisuuksiin perustuva matemaattinen mallintaminen olisi hyvin vaikeaa ellei mahdotonta. Tässä työssä urautumista ei pyritäkään mallintamaan perustuen tien tarkkoihin ominaisuuksiin, kuten nopeusrajoituksiin, kaarteisiin tai asfaltin laatuun ja koostumukseen. Sen sijaan työssä tuotetaan urautumista stokastisena prosessina, jolla pyritään tuottamaan mahdollisimman aidonolaisia pituussuuntaisia uraprofiileja. Tämä on koko työn kannalta keskeinen lähtökohta.

Urauttamismallin lähtöprofiilimallin ideana on tuottaa epähomogeenisia uraprofiileja autoregressiivisenä prosessina (AR-prosessina). Lähtöprofiilimalli tuottaa kahden vuoden ikäisen päällysteen uraprofiileja, joita sitten urautetaan edelleen urauttamismallin ennustemallilla.

2.2 Asfalttityypit ja päällystysmenetelmät

Seuraavaksi kuvataan työn kannalta oleelliset asfalttityypit ja päällystysmenetelmät. Tämän työn urauttamismalli tullaan rakentamaan asfalttibetonipäällysteisille teille, mutta sitä voi mahdollisesti käyttää myös kivimastiksiasifalttipäällysteisille teille.

Päällystysmenetelmät nousevat esiin, kun mallin parametrit estimoidaan ja mallia verifioidaan todellisen aineiston pohjalta. Tärkeintä on ymmärtää ero varsinaisten uudelleenpäällystysmenetelmien ja remix-menetelmien välillä sekä se, mitä tässä työssä tarkoitetaan väliaikaispaikkauksella.

Tämä luku on kirjoitettu pääosin julkaisun Päällysteiden suunnittelu (Tielaitos, 1998) pohjalta.

2.2.1 Asfalttityypit

AB eli asfalttibetoni on yleisin kohtalaisen vilkasliikenteisten teiden (KVL 1 000–6 000) päällyste. Kuten muutkin asfaltit, asfalttibetoni koostuu pääosin bitumista sekä kiviaineksesta. Kiviaineksen rakeisuuskäyrä on jatkuva, eli siinä on kaikenkokoista kiviainesta aivan pienestä maksimiraekokoon saakka.

SMA eli kivimastiksiasifaltti on hyvin vilkasliikenteisille teille suositeltu päällyste. Sen kiviaines on karkeaa ja lähes tasarakeista. SMA kestää asfalttibetonia paremmin kulu- tusta, mutta se on kalliimpaa.

PAB eli pehmeä asfalttibetoni on vähäliikenteisemmille teille suositeltu päällyste. Se kestää tavanomaista asfalttibetonia paremmin routimista, mutta pehmeänä de- for- moituu helpommin. Sen valmistamiseen ei tarvita yhtä suuria lämpötiloja kuin tavan- omaisen asfalttibetonin tapauksessa, joten sitä voidaan tuottaa kevyemmillä siirret- tävillä asemilla.

2.2.2 Päällystysmenetelmät

Varsinaiset uudelleenpäällystysmenetelmät

LTA tarkoittaa tasapaksua päällystelaattaa tasatulle alustalle. Vanha päällyste tasa- taan koneellisesti, ja päälle tehdään tasapaksuinen päällystelaatta.

MP eli massapinta- tus on vaihtelevan paksuinen tasaamattomalle alustalle tehty pääl- lyste.

MPK on tasaamattomalle, kuumennetulle alustalle tehty vaihtelevan paksuinen pääl- lyste. Tätä menetelmää käytetään nykyään harvoin.

MPKJ on massapinta- tus kuumalle, kuumajyrsitylle alustalle. Päällyste kuumajyrsitään, jonka jälkeen alusta tasataan jyrsityllä massalla. Tasatulle alustalle levitetään välit- tömästi uusi päällyste.

Remix-menetelmät

REM eli REMIX-pintausta on menetelmä, jossa vanha asfalttipäällyste kuumennetaan tiellä kulkevilla kuumentimilla, jyrksitään irti, sekoitetaan uuden massan kanssa ja levitetään takaisin tielle.

REM+ eli REMIX+ -pintausta tarkoittaa massan levittämistä kahtena kerroksena. Uusiomassa levitetään alle ja lisämassa päälle.

Väliaikaispaikkaus

Väliaikaispaikkauksella tarkoitetaan satametrinen ajourien syvimpien kohtien paikkaamista siten, että satametrinen on turvallisesti liikennöitävässä kunnossa vielä muutaman vuoden ennen varsinaista päällystystoimenpidettä. Varsinaisena menetelmänä on UREM eli ura-REMIX-pintausta, joka on periaatteeltaan samanlainen kuin REM, mutta tehdään vain uran kohdalle noin metrin leveydeltä. Paikattavalle satametrille voidaan joutua tekemään maksimissaan 400 m² paikkaa. Näin käy, jos kaikki neljä ajouraa täytyy paikata koko pituudeltaan.

Väliaikaispaikkaus vastaa luonteeltaan paikkausohjeissa (Tiehallinto, 2009) esitettyä pysyvää paikkausta, mutta se kohdistuu tien uriin eikä vaurioihin.

2.3 ARMA-mallit

Työssä rakennettavan urauttamismallin lähtöprofiilimalli perustuu AR(1)-prosessiin, eli ensimmäisen asteen autoregressiiviseen prosessiin, joka kuuluu ARMA-prosessien perheeseen. Tässä luvussa esitellään lyhyesti ARMA-mallien teoriaa työn pohjaksi.

ARMA-prosessi tarkoittaa autoregressiivistä liukuvan keskiarvon prosessia (autoregressive moving average). ARMA-prosessit muodostavat stationaaristen stokastisten prosessien luokan. Stationaarinen prosessi vaihtelee vakiovarianssilla odotusarvonsa ympärillä.

Useimmiten ARMA-malleja käytetään aikasarjojen mallintamiseen, mutta niillä voidaan mallintaa muitakin peräkkäisistä havainnoista koostuvia stokastisia prosesseja. Tärkeää on peräkkäisten havaintojen välinen riippuvuus, eikä niinkään se, mistä havainnot ovat peräisin. Tässä työssä niillä mallinnetaan satametrinen urasyvyyden riippuvuutta edellisen satametrinen urasyvyydestä kahden vuoden kuluttua päällystyksestä.

Luvussa 2.3.1 esitellään ARMA-mallien yhtälöt ja luvussa 2.3.2 käydään lyhyesti läpi Boxin ja Jenkinsin menetelmä ARMA-mallien rakentamiseen.

2.3.1 ARMA-mallien yhtälöt

Tarkastellaan AR(1)-mallin yhtälöä:

$$y_x = \phi_1 y_{x-1} + \varepsilon_x, \quad (1)$$

missä ε_x on puhtaasti satunnainen stokastinen prosessi, eli $\varepsilon_x \sim \text{i.i.d.}(0, \sigma^2)$. Lyhenne i.i.d. tulee sanoista independent and identically distributed eli riippumaton ja samoin jakautunut. Satunnaismuuttujan ε_x arvot ovat toisin sanoen valkoista kohinaa. Nyt y_x

on siis AR(1)-prosessi eli ensimmäisen asteen autoregressiivinen prosessi. Yhtälössä (1), kuten seuraavissakin ARMA-mallien yhtälöissä, y_x :n odotusarvo on 0. Mallissa satunnaismuuttujan y arvo kohdassa x riippuu satunnaismuuttujan y arvosta kohdassa $x-1$ kerrottuna parametrilla ϕ_1 sekä satunnaismuuttujan ε arvosta kohdassa x . Muuttujan y arvo riippuu tässä siis suoraan y :n edellisestä arvosta sekä kohinasta. Myös muut edeltävät havainnot vaikuttavat y :n arvoon välillisesti, sillä ne ovat vaikuttaneet y :n edelliseen arvoon. Tähän AR(1)-mallin yhtälöön päädytään luvuissa 3.3.1–3.3.3, joissa sovitetaan ARMA-malli urasyvyysdataan. Tässä teoriaosassa esitellään ARMA-malleja myös hieman yleisemmin, jotta voidaan perustella, miksi työssä päädyttiin juuri AR(1)-malliin.

Yleisen AR-mallin, eli AR(p)-mallin yhtälö on seuraava:

$$y_x = \phi_1 y_{x-1} + \phi_2 y_{x-2} + \dots + \phi_p y_{x-p} + \varepsilon_x, \quad (2)$$

missä ε_x on valkoista kohinaa. Mallissa satunnaismuuttujan y arvo kohdassa x riippuu satunnaismuuttujan y arvoista kohdissa $x-1, x-2, \dots, x-p$ kerrottuna parametreilla $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ sekä satunnaismuuttujan ε arvosta kohdassa x . Nimityksellä autoregressiivinen malli tarkoitetaan sitä, että kyseessä on lineaarinen regressiomalli, jossa selittäjinä ovat muuttujan y edelliset arvot. Nyt y :n arvoon vaikuttavat suoraan p edellistä havaintoa sekä kohinatermi, mutta myös aikaisemmat havainnot vaikuttavat välillisesti.

Seuraavaksi esitellään MA-malleja. Tarkastellaan MA(1)-mallin yhtälöä:

$$y_x = \varepsilon_x + \theta_1 \varepsilon_{x-1}, \quad (3)$$

missä ε_x on valkoista kohinaa. Mallissa satunnaismuuttujan y arvo kohdassa x riippuu satunnaismuuttujan ε arvosta kohdassa x ja satunnaismuuttujan ε arvosta kohdassa $x-1$ kerrottuna parametrilla θ_1 . Muuttujan y arvo riippuu siis kahdesta satunnaismuuttujasta, jotka ovat peräisin puhtaasti satunnaisesta stokastisesta prosessista ε . Muuttujan ε arvo ei riipu mitenkään sen edellisestä arvosta. Tämä tarkoittaa, että arvoa ε_{x-1} edeltävillä ε :n arvoilla ei ole vaikutusta y_x :n arvoon.

Tarkastellaan vielä MA(1)-mallin havainnon y_x suhdetta sitä edeltäviin havaintoihin y_{x-1}, y_{x-2}, \dots . Arvo ε_{x-1} on ollut vaikuttamassa myös havainnon y_{x-1} arvoon, joten havaintojen y_x ja y_{x-1} välillä on riippuvuus, vaikka y_{x-1} ei suoraan vaikutakaan y_x :n arvoon. Havaintoon y_{x-2} ja sitä edeltäviin havaintoihin ε_{x-1} ei ole vaikuttanut, joten havaintojen y_{x-2} ja y_x välillä ei ole enää mitään riippuvuutta.

MA(q)-malli näyttää seuraavalta:

$$y_x = \varepsilon_x + \theta_1 \varepsilon_{x-1} + \theta_2 \varepsilon_{x-2} + \dots + \theta_q \varepsilon_{x-q}, \quad (4)$$

missä ε_x on valkoista kohinaa. Mallissa satunnaismuuttujan y arvo kohdassa x riippuu satunnaismuuttujan ε arvosta kohdassa x sekä satunnaismuuttujan ε arvoista kohdissa $x-1, x-2, \dots, x-q$ kerrottuna parametreilla $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$. Nimitys liukuvan keskiarvon (moving average) malli tulee siitä, että muuttujan y arvo on painotettu summa muuttujan ε arvoista. Tässä arvo ε_{x-1} on ollut vaikuttamassa edellisen havainnon y_{x-1} arvoon, ε_{x-2} on ollut vaikuttamassa kahden edellisen havainnon arvoihin ja niin edelleen.

Arvo ε_{x-q} on ollut vaikuttamassa vielä havainnon y_{x-q} arvoon, joten havainto y_{x-q} on viimeinen, jonka kanssa havainnolla y_x on riippuvuutta.

Yhdistämällä yhtälöt 2 ja 4 saadaan ARMA(p, q)-malli:

$$y_x = \phi_1 y_{x-1} + \phi_2 y_{x-2} + \dots + \phi_p y_{x-p} + \varepsilon_x + \theta_1 \varepsilon_{x-1} + \theta_2 \varepsilon_{x-2} + \dots + \theta_q \varepsilon_{x-q}. \quad (5)$$

Mallissa satunnaismuuttujan y arvo kohdassa x riippuu satunnaismuuttujan y arvoista kohdissa $x-1, x-2, \dots, x-p$ kerrottuna parametreilla $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ ja satunnaismuuttujan ε arvosta kohdassa x sekä satunnaismuuttujan ε arvoista kohdissa $x-1, x-2, \dots, x-q$ kerrottuna parametreilla $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$. Yhtälö on yhdistelmä AR(p) ja MA(q)-mallien yhtälöistä, joten havaintoon y_x vaikuttavat sekä AR(p)-prosessin että MA(q)-prosessin tekijät. Havaintoon y_x vaikuttavat siis suoraan p edellistä havaintoa ja välillisesti myös havaintoa y_{x-q} edeltävät havainnot. Lisäksi q kappaleeseen edellisiä havaintoja on yhteys prosessin ε kautta.

Jotta ARMA-prosessi olisi stationaarinen, on sen kertoimille tiettyjä ehtoja. Esimerkiksi AR(1)-mallille pitää olla $|\phi_1| < 1$. Jos malli ei ole stationaarinen, sen tuottamat arvot eivät vaihtelee enää odotusarvon ympäristössä, vaan ne karkaavat mielivaltaisen kauas odotusarvosta. Stationaarisen ARMA-prosessin odotusarvo $E(y_x)$ on 0. Jos mallilla halutaan mallintaa satunnaismuuttujaa, jonka arvot vaihtelevat muun kuin nollan ympärillä, mallinnetaan ARMA-mallilla satunnaismuuttujan poikkeamaa sen odotusarvosta. Tällöin poikkeaman odotusarvo on nolla. Jos mallinnettava prosessi ei ole stationaarinen, täytyy se yrittää saattaa stationaariseksi differensoimalla ja mahdollisesti logaritmoimalla. Differensoinnilla tarkoitetaan peräkkäisten havaintojen vähentämistä toisistaan, jolloin saadaan sarja tapahtuneista muutoksista. Logaritmoimalla saadaan suhteellisesti yhtä suurista eroista absoluuttisesti yhtä suuria.

ARMA-prosessin y_x varianssi ei ole yhtä kuin prosessin ε_x varianssi. Tämä on hyvä muistaa, kun tulevaisuissa luvuissa estimoidaan AR(1)-mallin parametreja. Esimerkiksi AR(1)-mallille varianssi:

$$\sigma_y^2 = \frac{\sigma^2}{1 - \phi_1^2}, \quad (6)$$

missä σ^2 on prosessin ε_x varianssi. Koska stationaariselle AR(1)-prosessille $|\phi_1| < 1$, seuraa kaavasta (6), että stationaariselle prosessille on aina $\sigma_y^2 > \sigma^2$. Vaikka prosessin ε_x varianssi olisi siis melko pieni, on varsinaisen prosessin y varianssi aina suurempi.

Lisätietoa ARMA-malleista löytyy esimerkiksi kirjoista *Introduction to Time Series and Forecasting* (Brockwell ja Davis, 2002) ja *Time Series Analysis – Forecasting and Control* (Box ym., 2008).

2.3.2 Boxin ja Jenkinsin menetelmä

Boxin ja Jenkinsin menetelmä on ARMA-mallien rakentamisstrategia. Tällä menetelmällä tullaan rakentamaan urasyvyysdatalle ARMA-malli ja päätymään AR(1)-malliin. Boxin ja Jenkinsin menetelmä koostuu kolmesta vaiheesta. Vaiheet ovat mallin identifiointi, estimointi sekä diagnostiset tarkistukset.

Identifiointilla tarkoitetaan mahdollisen differensoinnin kertaluvun sekä mallin astelukujen p ja q valintaa. Differensoinnin kertaluku valitaan differensoimalla sarjaa niin kauan, että sitä voidaan pitää stationaarisena. Jos aikasarja vaikuttaa siltä, että se

voisi olla peräisin stationaarisesta prosessista, sitä ei pidä differensoida, sillä turha differensointi hävittää sarjan autokorrelaatorakennetta.

Mallin astelukujen valinnassa hyödynnetään mallin autokorrelaatio- ja osittaisautokorrelaatiofunktioita. Autokorrelaatio kertoo siitä, kuinka voimakkaasti satunnaismuuttujan arvo y_x riippuu sen edellisistä arvoista y_{x-1}, y_{x-2}, \dots . Riippuvuus ei tarkoita välttämättä syy-seuraussuhdetta. Osittaisautokorrelaatio kuvaa y_x :n riippuvuutta sen edellisistä arvoista siten, että väliin jäävien arvojen vaikutus on eliminoitu. Esimerkiksi AR(1)-prosessissa muuttujan y_x arvo riippuu vain sen edellisestä arvosta y_{x-1} (ja kohinasta). Kuitenkin myös y_x :n ja arvojen y_{x-2}, y_{x-3}, \dots välillä on autokorreloituneisuutta, sillä y_x :n arvo riippuu y_{x-1} :n arvosta, joka puolestaan taas riippuu y_{x-2} :n arvosta jne. Osittaisautokorrelaatiota y_x :n ja arvojen y_{x-2}, y_{x-3}, \dots välillä ei ole.

Mallin astelukuja valittaessa voidaan hyödyntää seuraavaa taulukkoa. Huomataan, että ARMA(p, q)-prosessille astelukuja ei voi valita autokorrelaatiofunktioiden perusteella. Joka tapauksessa astelukujen lopullinen valinta tehdään tarkastelemalla estimoituja malleja, eli diagnostisista tarkistuksista palataan takaisin identifiointivaiheeseen, jos malli ei ole diagnostisten tarkistusten perusteella riittävä.

Taulukko 1. ARMA-prosessien auto- ja osittaisautokorrelaatiofunktioiden ominaisuuksia.

Malli	Autokorrelaatiofunktio	Osittaisautokorrelaatiofunktio
AR (p)	Vaimenee eksponentiaalisesti	Katkeaa viipeellä p
MA (q)	Katkeaa viipeellä q	Vaimenee eksponentiaalisesti
ARMA (p, q)	Vaimenee eksponentiaalisesti	Vaimenee eksponentiaalisesti

Toisessa vaiheessa mallin parametrit ϕ_1, \dots, ϕ_p ja $\theta_1, \dots, \theta_q$ estimoidaan suurimman uskottavuuden menetelmällä. Tämä tapahtuu käyttäen estimointiin sopivaa ohjelmistoa.

Kolmas vaihe, diagnostiset tarkistukset, perustuu estimoidun mallin residuaalien eli jäännöstermien tutkimiseen. Residuaalit lasketaan ennustamalla ARMA-mallilla satunnaismuuttujan y arvot edellisten havaintojen perusteella. Ennustelle käytetään merkintää \hat{y} . Kun todellisesta arvosta vähennetään ennuste, saadaan jäännöstermi eli residuaali. AR(1)-mallille residuaalit lasketaan siis kaavasta:

$$\hat{\varepsilon}_x = y_x - \hat{y}_x = y_x - \hat{\phi}_1 y_{x-1}, \quad (7)$$

missä $\hat{\phi}_1$ on suurimman uskottavuuden menetelmällä laskettu estimaatti tuntemattomalle parametrille ϕ_1 . ARMA-mallia pidetään riittävänä, jos sen residuaalit $\hat{\varepsilon}$ ovat valkoista kohinaa. Residuaalien tulisi siis olla normaalisti jakautuneita ja autokorreloimattomia. Residuaalin $\hat{\varepsilon}_x$ arvo ei saa riippua x :n eikä ennusteen \hat{y}_x arvosta. Näitä asioita voidaan tarkastella graafisesti residuaalien muodostaman aikasarjan kuvaajan, residuaalien auto- ja osittaisautokorrelaatiofunktioiden kuvaajien sekä $(\hat{y}, \hat{\varepsilon})$ -kuvaajan perusteella. Normaalisuutta voidaan tarkastella Q-Q -kuvista ja testata normaalisuustesteillä, esimerkiksi Shapiron-Wilkin testillä (Laininen, 2001, ss. 56–60). Residuaalien korreloimattomuutta voidaan myös testata tilastollisesti. Jos malli eri ole riittävä, täytyy palata takaisin identifiointivaiheeseen.

Lisätietoa ARMA-mallien rakentamisesta sekä Boxin ja Jenkinsin menetelmästä löytyy esimerkiksi kirjoista Time Series Analysis – Forecasting and Control (Box ym., 2008) ja Applied Statistical Time Series Analysis (Shumway, 1988).

3 Urauttamismalli

3.1 Urauttamismallin periaate

Työssä kehitetyn urauttamismallin tehtävänä on tuottaa epähomogeenisia uraprofiileja, joille työn simulointimalli toteuttaa strategian mukaisia toimenpiteitä suoraviivaisten päätössääntöjen mukaisesti. Urauttamismalli implementoidaan mukaan itse simulointimalliin. Urauttamismalli on ehdottomasti koko simulointimallin tärkein osa, sillä sen täytyy pystyä mallintamaan uskottavasti teiden epähomogeenista urautumista, jotta ylläpitostrategioita koskevan simuloinnin tulokset olisivat luotettavia.

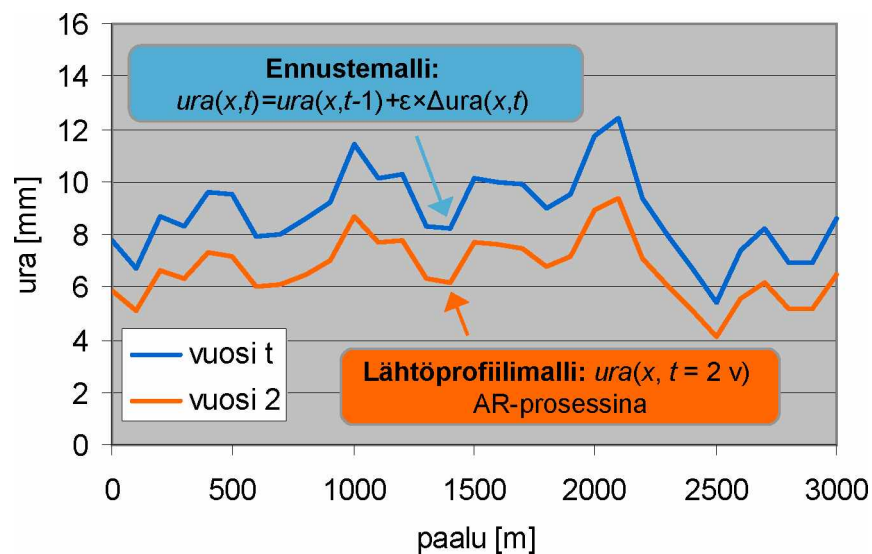
Urauttamismalli, kuten varsinainen simulointimallikin, toimii sijainnin suhteen sadan metrin ja ajan suhteen vuoden tarkkuudella, eli kunkin satametrisen urasyvyyttä kuvaa yksi luku, joka päivittyy vuoden välein. Tämä vastaa todellisen päällystysohjelmoinnin käytäntöä. Uraprofiililla tarkoitetaan urasyvyyttä pituussuuntaisen etäisyyden eli paaluluvun funktiona, ja siinä on siis yksi arvo jokaista satametrinä kohden.

Urauttamismalli koostuu lähtöprofiilimallista ja ennustemallista. Mallin toiminta perustuu urasyvyysdataa tarkastelemalla tehtyyn havaintoon siitä, että uraprofiilille tyypillinen muoto näyttäytyy jo kahden vuoden ikäisen päällysteen kohdalla. Työssä käytetty aineisto on Liikenneviraston satametrisdataa.

Malli toimii siten, että lähtöprofiilimalli tuottaa stokastisena prosessina kahden vuoden ikäisen päällysteen uraprofiileja, joita ennustemalli sitten urauttaa lisää. Ennustemalli on toteutettu aikaisemman tutkimuksen pohjalta (Spoof ym., 2005). Lähtöprofiilimalli on sen sijaan rakennettu kokonaisuudessaan tämän työn puitteissa.

Urauttamismalli ei pyri mallintamaan urautumista perustuen tien tarkkoihin ominaisuuksiin, kuten nopeusrajoituksiin, kaarteisiin tai asfaltin koostumukseen. Tuotettavien uraprofiilien ei tarvitse seurata mitään todellista mitattua profiilia esimerkiksi siten, että huippukohdat ja matalimmat kohdat osuisivat kohdakkain. Tärkeää on puolestaan se, että uraprofiilit vastaavat *luonteeltaan* oikeita uraprofiileja. Luonteella tarkoitetaan tässä muun muassa erittäin syvien ja matalien kohtien määriä, niiden pituuksia, välimatkoja ja urasyvyyksiä. Nämä seikat vaikuttavat oleellisesti muun muassa päällystyskohteiden pituuksiin, kun mallilla simuloidaan ylläpitotoimenpiteitä ja kohteet valitaan millimetrimittajien perusteella. Sen sijaan strategioita vertailtaessa ei ole väliä, mikä kohta tieosuudella urautuu nopeimmin tai hitaimmin.

Urauttamismallin toimintaa on havainnollistettu kuvassa 1, jossa esitetään, kuinka ennustemalli urauttaa lähtöprofiilimallin tuottamaa uraprofiilia.



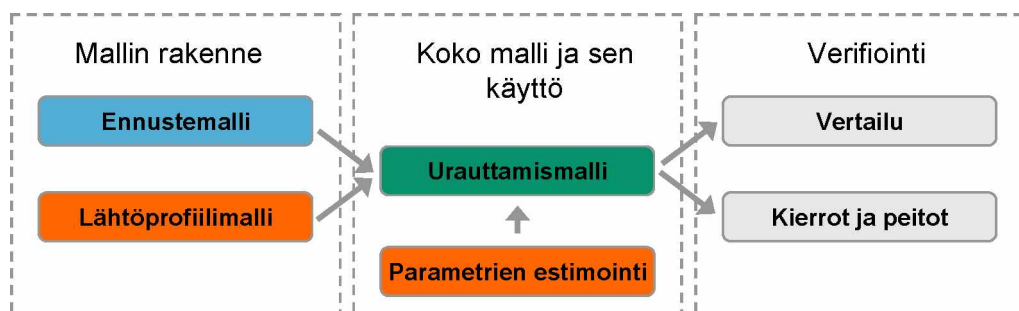
Kuva 1. Urauttamismallin toiminta esitettyinä uraprofiilien avulla.

Mallin lähtökohtana on kahden vuoden ikäisen päällysteen uraprofiili. Seuraavien vuosien urasyvydet tuotetaan ennustemallilla, joka lisää urasyvyyttä. Ennustemallin idea on matemaattisena kaavana seuraava:

$$ura(x, t) = ura(x, t - 1) + \varepsilon \times \Delta ura(x, t). \quad (8)$$

Uraisyvyys on siis satametrinen (x) ja vuoden (t) funktio. Termi $\Delta ura(x, t)$ edustaa kaavassa ennustemallin antamaa determinististä urasyvyyden muutosta, jota sitten kerrotaan kohinatermillä ε , jonka odotusarvo on 1.

Kuvassa 2 on esitetty urauttamismallin rakenne, käyttö ja verifiointi kaaviona.



Kuva 2. Kaaviokuva urauttamismallista ja sen käytöstä.

Kuvasta 2 nähdään, että malli koostuu urauttamismallista ja ennustemallista. Jotta mallia voidaan käyttää, on sille estimoitava parametrit. Mallirakenne on itse asiassa sellainen, että vain lähtöprofiilimallissa on estimoitavia parametreja, mutta lähtöprofiilimallin parametrit vaikuttavat välillisesti uraprofiilien muodostumiseen myös seuraavina vuosina.

Lähtöprofiilimallilla generoidun uraprofiilin sijasta simuloinnin lähtökohtana voi olla myös todellisen tien todellinen uraprofiili, jolloin tietä lähdetään urauttamaan ennustemallilla todellisen uraprofiilin pohjalta. Tällaisissakin simulaatioissa lähtöprofiilimallia kyllä tarvitaan, koska sillä generoidaan uudet uraprofiilit päällystystoimenpiteiden jälkeen.

Urauttamismallin todenmukainen toiminta on erittäin tärkeää tulosten luotettavuuden kannalta, ja siksi urauttamismallin toimintaa verifioitiin huolellisesti. Mallin toimintaa kokonaisuudessaan verifioitiin vertailemalla sen tuottamia uraprofiileja todellisiin uraprofiileihin sekä vertailemalla mallin tuottamia peittoprosentteja ja kiertoai-koja aiempien selvitysten tuloksiin.

Urauttamismallin yksityiskohtainen rakenne esitellään seuraavasti (vrt. kuva 2). Luvussa 3.2 esitellään ennustemalli, eli kerrotaan miten yhtälön (8) termit $\Delta u(x, t)$ ja ε määräytyvät. Luvussa 3.3 rakennetaan AR-prosessiin perustuva lähtöprofiilimalli, estimoidaan sille parametrit ja esitellään lähtöprofiilimallin toimintaa. Luvussa 3.4 ennustemallin toimintaa kuvataan kokonaisuutena. Luvussa 3.5 kerrotaan, miten urauttamismallin toimintaa on verifioitu.

3.2 Ennustemalli

Urauttamismallin ennustemallin tehtävänä on tuottaa uran arvo seuraavalle vuodelle siihen saakka toteutuneen urakehityksen perusteella. Se perustuu Tiehallinnon raportissa PMSPro:n kuntoennustemallit 2004 (Spoof ym., 2005) esitettyyn ennustemalliin. (PMSPro on päällystysohjelmointiin käytettävä ohjelmisto.) Kyseisessä raportissa esitetään ennustemallit uralle, tasaisuudelle ja vaurioille PMSPro:ta varten. Raportissa esitetty uran ennustemalli on seuraava:

$$\Delta u(x, t+1) = 0.49 \times [u(x, t) / ikä(x, t) + 0.13 \times \log_{10}(KVL(x)) - 0.45], (9)$$

missä $\Delta u(x, t+1)$ on ennuste urasyvyyden kasvulle millimetreinä seuraavan vuoden aikana, $u(x, t)$ on satametrisen urasyvyys millimetreinä ja $ikä(x, t)$ on päällysteen ikä vuosina. $KVL(x)$ on satametrisen keskimääräinen vuorokausiliikenne (ajoneuvoa vuorokaudessa). Mallia käytetään siis erikseen kullekin satametriselle kunakin vuonna t . Tämän työn ennustemalli perustuu kaavaan (9).

Mallin (9) kertoimet on estimoitu asfalttibetonipäällysteille (AB), ja mallin selitysaste (R^2) on 0.41. Kyseisessä raportissa esitetään myös samaa muotoa oleva malli pehmeille asfalttibetonipäällysteille (PAB). Koska PAB-päällysteitä käytetään vain vähäliikenteisillä, hitaasti urautuvilla teillä, PAB-mallin käytölle ei ole tarvetta tässä työssä.

Raportissa mallia (9) verrataan PMSPro:n ennustemalliin. PMSPro:n ennustemalli on seuraava (TietoEnator Oyj, 2005):

$$u_{e_t} = u_{a_m} + (ikä_e \times urakehitys), (10)$$

missä u_{e_t} on ennustettu urasyvyys millimetreinä, u_{a_m} on mittaushetken urasyvyys millimetreinä, $ikä_e$ on päällysteen ikä mittauksesta ennustevuoteen ja

$$\text{urakehitys} = (\text{ura}_m - \text{alkupainuma}) / \text{ikä}_m, \quad (11)$$

missä alkupainuma on uuden päällysteen urasyvyys ja ikä_m on päällysteen ikä mittaushetkellä. Tätäkin mallia käytetään erikseen kullekin satametriseille. PMSPPro:n malli siis ennustaa satametrisen urautumisen jatkuvan samalla nopeudella kuin kyseinen satametrinen on keskimäärin urautunut mittaushetkeen asti.

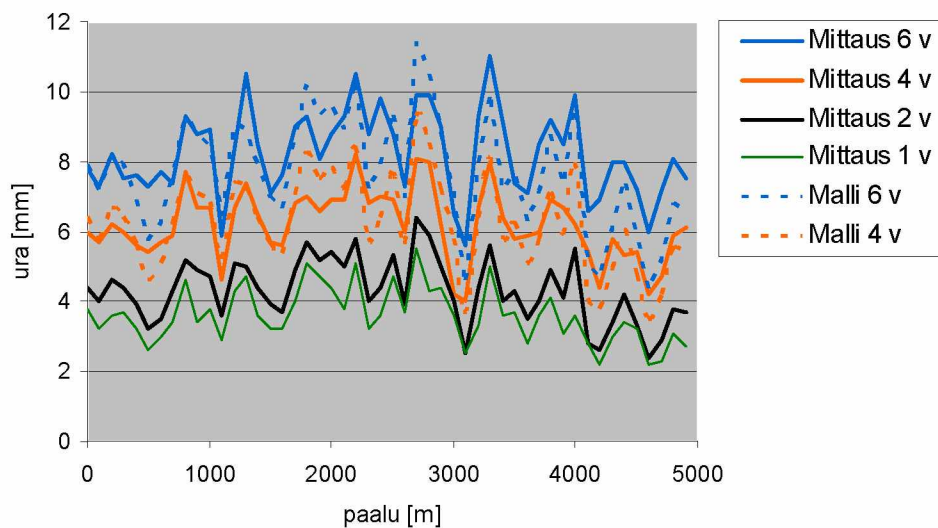
Raportissa (Spoof ym., 2005) todetaan, että uusi malli (9) antaa keskimäärin tarkempia tuloksia, mutta huonokuntoisilla teillä PMSPPro:n malli (10) ja (11) on tarkempi. Raportissa päädytään siksi suosittelemaan, että PMSPPro:n malli säilytetään ennallaan.

Tässä työssä ennustemallia käytetään siten, että todellisen tai lähtöprofiilimallilla tuotetun urakehityksen pohjalta lasketaan ura seuraavalle vuodelle. Tämän perusteella taas lasketaan ura sitä seuraavalle vuodelle ja niin edelleen. Kaavaa (8) käytetään siis siten, että termi $\Delta \text{ura}(x, t)$ määräytyy edellisen vuoden urasyvyyden $\text{ura}(x, t-1)$ perusteella. Laskemalla yhteen termit $\varepsilon \times \Delta \text{ura}(x, t)$ ja $\text{ura}(x, t-1)$ saadaan urasyvyys $\text{ura}(x, t)$. Seuraavan vuoden termi $\Delta \text{ura}(x, t+1)$ puolestaan määräytyy urasyvyyden $\text{ura}(x, t)$ perusteella. Todellista mittaustietoa ei siis ole käytettävissä, vaan malli ruokkii itse itseään.

Tässä malli (9) toimii paremmin kuin PMSPPro:n malli (10) ja (11), joka taas ei ole lainkaan käyttökelpoinen työn tarkoituksiin, sillä se tuottaisi tähän työhön sovellettuna lineaarisen urakehityksen. Raportissa esitetty malli (9) sen sijaan tuottaa todenmukaisen käyrän, jossa urautuminen hidastuu ajan myötä. Mallissa logaritmitermin vaikutus ei ole kovin suuri, mutta sen sijaan $\text{ura}(x, t)/\text{ikä}(x, t)$ -termin selvästi alle yhden olevan kertoimen vaikutus on merkittävä.

Ennustemallin toimintaa on havainnollistettu kuvassa 3, jossa on esitetty kantatien 65 todellisia ja mallilla (9) ennustettuja uraprofiileja viiden kilometrin matkalta. Ennusteet otettiin suoraan mallista ilman myöhemmin lisättävää kohinatermiä, jotta mallin hyvyttä päästiin tarkastelemaan parhaan ennusteen pohjalta. Kyseisen kohdan keskimääräinen vuorokausiliikenne (KVL) on 3046 ajoneuvoa ja päällysteenä on asfalttibetoni (AB). Kyseiselle osuudelle on tehty massapintausta kuumajyrsinnällä (MPKJ) vuonna 2002.

Kuvassa 3 on esitetty yhtenäisellä viivalla mittaustulokset yhden, kahden, neljän ja kuuden vuoden kuluttua päällystyksestä. Katkoviivalla on esitetty mallilla (9) ennustetut urasyvydet neljän ja kuuden vuoden ikäiselle päällysteelle. Ennusteet on laskettu siten, että kahden vuoden ikäisen päällysteen mittaustuloksen pohjalta on ennustettu kolmen vuoden ikäisen päällysteen urasyvyys ja tämän ennusteen pohjalta on taas ennustettu neljän vuoden ikäisen päällysteen urasyvyys ja niin edelleen. Jotta kuva olisi selkeämpi, on kolmen ja viiden vuoden ikäisen päällysteen uraprofiilit jätetty pois sekä mittausten että ennusteiden osalta. Yhden vuoden ikäisen päällysteen urasyvyys (alimmainen käyrä) on mukana vain vertailun vuoksi. Ennusteita laskettaessa käytetyt tiedot ovat siis kahden vuoden ikäisen päällysteen urasyvyys sekä KVL.



Kuva 3. Ennustemallin tuottamia sekä mitattuja uraprofiileja viiden kilometrin matkalta kantatieltä 65. Kuvassa on ennusteen odotusarvot, eli termi $\varepsilon = 1$.

Kuvassa 3 ennusteet näyttäisivät toimivan melko hyvin. Välillä ennuste on todellista suurempi ja välillä todellista pienempi. Uralle tyypillinen profiili näyttäytyy jo kahden vuoden urassa ja melko hyvin jopa yhden vuoden urassa. Nopeimmin urautuvien kohtien urasyvyys on suuri jo kahden vuoden kohdalla, ja hitaimmin urautuvat kohdat ovat urautuneet hitaasti myös kahtena ensimmäisenä vuonna.

Mallia käytettiin samaan tapaan hieman yli kymmenelle tieosuudelle, joista jokainen oli päällystetty yhdellä kertaa käyttäen samaa menetelmää koko matkalla. Tällaisia yhdellä kertaa samalla menetelmällä päällystettyjä osuuksia kutsutaan jatkossa yhtenäisiksi osuuksiksi.

Vertailuun otetut yhtenäiset osuudet oli päällystetty joko vuonna 2001, 2002 tai 2003. Yleisesti ottaen malli toimii hyvin. Joskus malli toki yliennustaa, ja joskus se aliennustaa. Malli toimii siten, että nopeasti urautuneet kohdat urautuvat jatkossakin nopeasti, ja hitaasti urautuneiden kohtien urat syvenevät hitaasti, mikä vastaa todellisen urasyvyyden kehityksen luonnetta. Koska mallia käytetään simulointiin, ei sen tarvitse toimia yksittäisille osuuksille erityisen tarkasti. Sen sijaan on tärkeää, että ennustemalli toimii keskimäärin hyvin, ja että sen toiminta vastaa todellisen urakehityksen luonnetta. Tässä vaiheessa todetaan, että ennustemalli näyttäisi toimivan riittävän hyvin. Todelliseen testiin malli joutuu luvussa 3.5, kun se yhdistetään lähtöprofiiliin ja mallia verifioidaan kokonaisuutena.

Mallin kohinatermi ε tuo vaihtelua urautumisnopeuksiin. Kuten edellä todettiin, kaikki tiet eivät uraudu ennustemallin antamalla nopeudella. Vaihtelu urautumisnopeuksissa aiheuttaa muun muassa sen, että myöhemmin päällystetty osuus voi saavuttaa urasyvyydessä viereisen, hieman aiemmin päällystetyn osuuden, jolloin osuudet voidaan seuraavalla kerralla päällystää yhdellä kertaa.

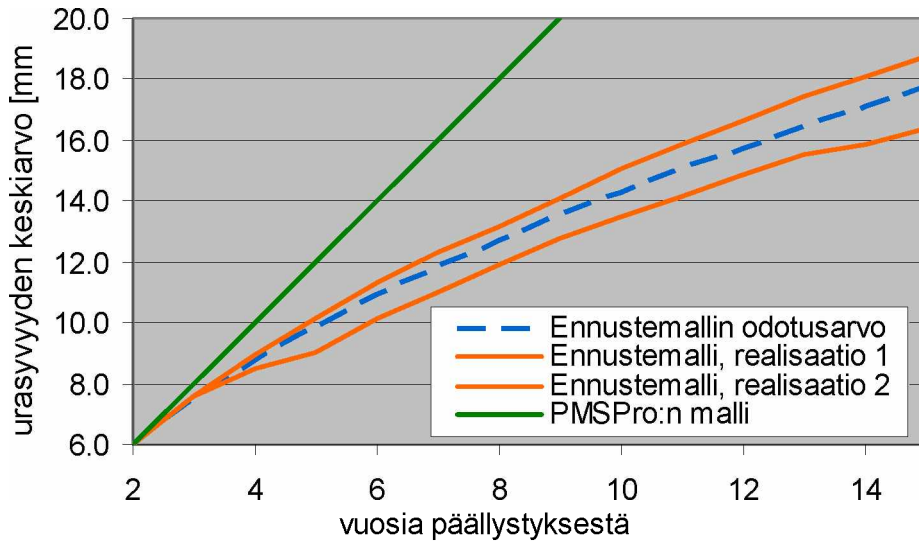
Kun kohinatermi ε kirjoitetaan näkyviin, on ennustemalli kokonaisuudessaan seuraava:

$$\begin{aligned} \text{ura}(x, t) &= \text{ura}(x, t-1) + \varepsilon \times \Delta \text{ura}(x, t) \\ &= \text{ura}(x, t-1) + \varepsilon \times \{0.49 \times [\text{ura}(t-1) / \text{ikä}(t-1) + 0.13 \times \log_{10}(\text{KVL}) - 0.45]\}, \end{aligned} \quad (12)$$

missä $\varepsilon \sim N(1, \sigma^2)$. Kohina olisi voitu toteuttaa malliin monella tavalla. Nyt on käytetty multiplikatiivista tapaa, eli ε on Δ -termin kertoimena. Additiivinen tapa toimisi siten, että ε :n odotusarvo olisi 0, ja ε lisättäisiin termiin $\Delta \text{ura}(x, t)$. Multiplikatiivisen tavan etu verrattuna additiiviseen on se, että vaihtelu on suhteessa yhtä suurta riippumatta mallin antamasta urautumisnopeudesta. Oletetaan, että multiplikatiivisessa mallissa $\Delta \text{ura}(x, t) = 0.5$ mm ja arvottu $\varepsilon = 0.8$. Tällöin urasyvyys kasvaa lopulta 0.8×0.5 mm = 0.4 mm. Jos olisi $\Delta \text{ura}(x, t) = 2$ mm, saataisiin urasyvyyden kasvuksi 0.8×2 mm = 1.6 mm. Molemmissa tapauksissa urasyvyyden kasvu skaalautuisi siis 20 % alaspäin. Additiivisessa tavassa $\Delta \text{ura}(x, t) = 0.5$ mm ja $\varepsilon = -0.1$ mm antaisi 0.5 mm – 0.1 mm = 0.4 mm. Nopeammin urautuvassa kohdassa kohinan vaikutus jäisi vaatimattomaksi, eli urasyvyys kasvaisi 2 mm sijasta 1.9 mm. Siksi kohina toimii paremmin toteutettuna kerrointermillä, eli multiplikatiivisesti. Tässä työssä kohinalle käytetään pääosin parametreja $\mu = 1$ ja $\sigma = 0.2$. Kohinan keskihajonta σ on arvioitu, mutta myöhemmin tutkitaan, kuinka keskihajonnan muuttaminen vaikuttaa simulointituloksiin.

Kohinatermi ε on sama yhdellä kertaa päällysten osuuden jokaiselle satametriselle, mutta se vaihtelee vuosittain. Näille valinnoille on seuraavat perustelut: Jos kohinatermi olisi eri jokaiselle satametriselle, se odotusarvoisesti nopeuttaisi päällystyskiertoa. Päällystystoimenpiteen ajoitus riippuu siitä, milloin suurimmat urasyvyydet ylittävät tietyn millimetrirajan. Oletusarvoisesti ainakin yksi lähellä toimenpiderajaa olevista kohdista vahvistuisi ja toimenpide aikaistuisi. Kun kohinatermi on sama yhdelle osuudelle, se ei odotusarvoisesti nopeuta eikä hidasta päällystyskiertoa. Kohinatermit kuitenkin vaihtelevat vuosittain (vrt. esim. säästä aiheutuvat kuormitusolosuhteiden vaihtelut). Muuten ykkösestä poikkeavien kohinatermien vaikutukset kertautuisivat, ja tie urautuisi joko valtavan nopeasti tai todella hitaasti.

Kuvassa 4 on esitetty miten malli ennustaa urasyvyyden keskiarvon käyttäytyvän, kun ennusteet lasketaan kahden vuoden ikäisen päällysteen mittauksen pohjalta. Keskimääräinen urasyvyys kahden vuoden ikäiselle päällysteelle on 6 mm ja KVL 6 000.



Kuva 4. Mallin ennustama urasyvyyden keskiarvon kehitys KVL:n 6 000 tiellä, kun 2 v uran keskiarvo on 6 mm: odotusarvoinen kehitys sekä kaksi realisaatiota mallista. Vertailun vuoksi kuvassa on myös PMSPPro:n mallin antama ennuste. Huomaa, että akselit eivät ala nolasta.

Kuvaan 4 on merkitty katkoviivalla ennustemallin antama odotusarvoinen kehitys, joka saadaan asettamalla kaikki kohinatermit ykkösiksi. Odotusarvoisen kehityksen ympärillä on kaksi realisaatiota mallista, kun $\varepsilon \sim N(1, 0.2^2)$. Malli tuottaa uskottavan urakehityksen, jossa urautuminen hidastuu ajan myötä. Suora viiva edustaa PMSPPro:n ennustetta ilman mittauksia, kun alkupainumaksi oletetaan 2 mm, jolloin urakehitys on 2 mm/vuosi.

Aiemmin todettiin, että PMSPPro:n malli ei ole käyttökelpoinen tässä yhteydessä, mikä on nähtävissä myös kuvasta 4. Varsinaisessa käyttötarkoituksessaan PMSPPro:n malli sen sijaan toimii huomattavasti paremmin. Todellisessa päällystysmaailmassa uudet mittaukset saadaan pääteille joka vuosi ja muillekin teille muutaman vuoden välein, jolloin mallilla tarvitsee ennustaa maksimissaan muutaman vuoden päähän. Tässä työssä ennustemalli ruokkii itse itseään, eikä todellista mittausaineistoa ole käytettävissä. Siksi PMSPPro:n mallin lineaarinen ennuste ei toimi tässä työssä.

3.3 Lähtöprofiilimalli

Ennustemallin yhteydessä havaittiin, että tulevien vuosien uraprofiilille tunnusomainen muoto on nähtävissä jo kahden vuoden ikäisen päällysteen mittauksista (kuva 3). Lähtöprofiilimallin tehtävänä on generoida näitä kahden vuoden ikäisen päällysteen uraprofiileja, joista ennustemallilla sitten tuotetaan urasyvyydet seuraaville vuosille. Lähtöprofiilimallia tarvitaan heti simulointi-iteraation alussa, jos käytössä ei ole lähtöprofiilina todellista uraprofiilia. Lisäksi lähtöprofiilimallia tarvitaan aina mallin tekemän päällystystoimenpiteen jälkeen.

Lähtöprofiilimalli perustuu AR-malliin (autoregressiiviseen malliin), joka rakennetaan Boxin ja Jenkinsin menetelmällä. Luvussa 3.3.1 esitetään mallin identifiointi, eli mää-

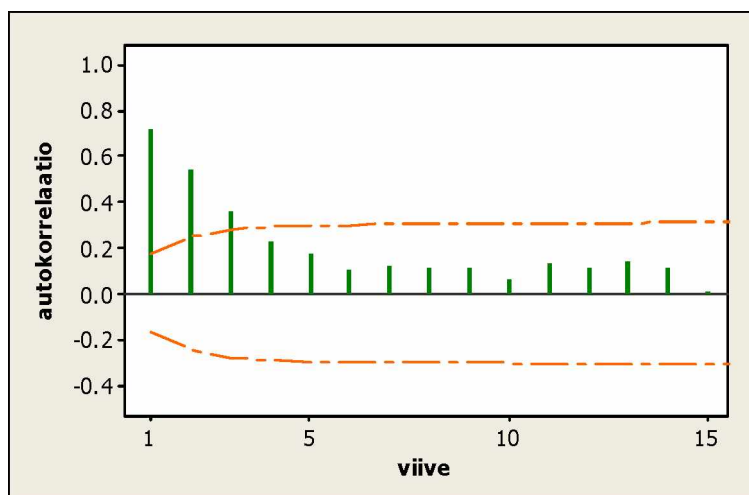
ritetään mallin asteluvut ja luvussa 3.3.2 esitetään estimoituja parametreja. Luvussa 3.3.3 kerrotaan diagnostisista tarkastuksista, joilla todettiin että AR-mallilla voidaan mallintaa kahden vuoden ikäisen päällysteen uraprofiileja. Luvussa 3.3.4 esitellään minimiurasyvyyskorjaus, joka on pieni lisäominaisuus AR-malliin. Luvussa 3.3.5 näytetään, miten AR-mallin parametrit vaikuttavat tuotettujen uraprofiilien luonteeseen. Lopuksi luvussa 3.3.6 määritetään lineaarinen regressiomalli, josta kahden vuoden ikäisen päällysteen urasyvyyden odotusarvo määräytyy.

3.3.1 AR-mallin identifiointi

On selvää, että peräkkäisten satametrinen urasyvyydet ovat autokorreloituneita. Jos satametrinen urasyvyys on suuri, on todennäköisesti seuraavankin satametrinen urasyvyys suuri. Tästä voidaan päätellä, että todenmukaisia lähtöprofiileita voisi mahdollisesti luoda ARMA-prosessina (Auto Regressive Moving Average process, autoregressiivinen liukuvan keskiarvon prosessi). Seuraavaksi esitetään, kuinka kahden vuoden ikäisen päällysteen uraprofiileille valittiin ARMA-mallin asteluvut urasyvyyden auto- ja osittaisautokorrelaatiofunktioita tarkastelemalla.

Työssä tutkittiin yhdeksän yhtenäistä tieosuutta, jotka oli päällystetty vuosina 2001, 2002 tai 2003. Kiinnostuksen kohteena oli kahden vuoden ikäisen päällysteen urasyvyys. Urasyvyydet keskistettiin, eli tarkastelun kohteena olivat tarkkaan sanoen satametrinen poikkeamat kyseisen osuuden kahden vuoden urasyvyyden keskiarvosta. Osuudet listataan seuraavan luvun taulukossa 2.

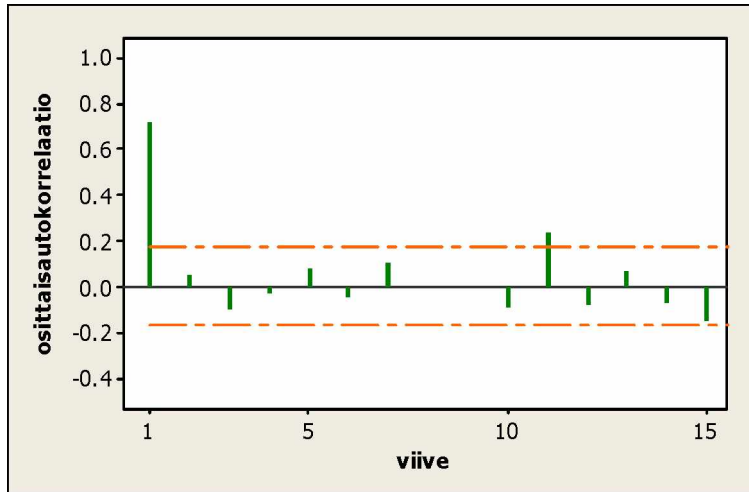
Valtatietä 25 oli mukana AB-päällysteinen 13.1 kilometrin tieosuus, jonka KVL on 3967. Kyseiselle osuudelle on tehty massapintausta (MP) vuonna 2001. Kuvassa 5 on esitetty osuuden urasyvyydelle estimoidut autokorrelaatiot viipeillä 1–15. Kuvasta huomataan autokorrelaatiofunktion vaimenevan.



Kuva 5. Estimoidut autokorrelaatiot valtatie 25 tarkasteltavan osuuden vuoden 2003 urasyvyyden poikkeamalle keskiarvosta. 95 prosentin merkitsevyysrajat on merkitty katkoviivalla.

Kuvassa 6 on esitetty vastaavasti estimoidut osittaisautokorrelaatiot. Osittaisautokorrelaatiofunktio katkeaa viipeellä yksi. Kuvassa viipeen 11 kohdalla näkyy satunnainen merkitsevyysrajan ylittävä piikki, jota ei tarvitse huomioida.

Autokorrelaatiofunktio vaimenee ja osittaisautokorrelaatiofunktio katkeaa viipeellä yksi, jolloin luvun 2.3.2 taulukon 1 nojalla voidaan päätellä, että uraprofiili voidaan mallintaa AR(1)-prosessina. Malliin ei siis tarvita lainkaan MA-osaa. Muillakin tutkituilla osuuksilla tultiin samanlaisiin johtopäätöksiin. Joillakin osuuksilla autokorrelaatio- ja osittaisautokorrelaatiofunktiot ovat helpommin ja toisilla vaikeammin tulkittavissa. Differenssoinneille ei varsinaisesti ollut tarvetta, sillä urasyvytydet olivat riittävän stationaarisia. Differenssointia kokeiltiin, mutta se hävitti sarjan autokorrelaatiotuneisuuden.



Kuva 6. *Estimoidut osittaisautokorrelaatiot valtatie 25 tarkasteltavan osuuden vuoden 2003 urasyvyyden poikkeamalle keskiarvosta. 95 prosentin merkitsevyysrajat on merkitty katkoviivalla.*

AR(1)-malli sovellettuna urasyvyyksiin näyttää seuraavalta:

$$\text{ura}(x) - E(\text{ura}) = \phi \times [\text{ura}(x-1) - E(\text{ura})] + \varepsilon_x, \quad (13)$$

missä $\text{ura}(x)$ on satametrinen urasyvyys, $\text{ura}(x-1)$ on edellisen satametrinen urasyvyys, $E(\text{ura})$ on kyseisen osuuden urasyvyyden odotusarvo, ε on normaalisti ja-kautunutta valkoista kohinaa odotusarvolla 0 ja keskihajonnalla σ . Kerroin ϕ on osuudelle vakio. Siirtämällä termi $E(\text{ura})$ oikealle puolelle saadaan kaava satametrinen urasyvyydelle:

$$\text{ura}(x) = \phi \times [\text{ura}(x-1) - E(\text{ura})] + \varepsilon_x + E(\text{ura}). \quad (14)$$

AR(1)-mallilla voidaan siis generoida uraprofiileja, kun valitaan parametrit ϕ , σ ja $E(\text{ura})$.

3.3.2 AR-mallin parametrien estimointi

Tässä luvussa esitellään aineistosta estimoituja AR(1)-mallin parametreja. Taulukossa 2 on esitetty yhdeksälle yhtenäiselle osuudelle suurimman uskottavuuden menetelmällä estimoidut parametrit sekä muita tietoja. Osuudet on valittu eteläisimpien elinkeino-, liikenne ja ympäristökeskusten (ELY) alueelta, jotta ilmasto-olot olisivat melko samanlaiset. Kaikki osuudet ovat AB-päällysteisiä. AR-mallin parametriesti-

maateista $\hat{\phi}$ vaihtelee välillä 0.49–0.87 ja $\hat{\sigma}$ välillä 0.55–0.95 mm. Lisäksi huomataan, että urasyvyyden keskiarvo vaihtelee välillä 3.9–5.7 mm.

Kertoimen ϕ poikkeavuutta nolasta testattiin parametrien estimoinnin yhteydessä Studentin t -testillä. Nollahypoteesina oli, että ϕ on 0. Kaikilla tutkituilla osuuksilla nollahypoteesi hylättiin, eli kerroin ϕ erosi tilastollisesti merkitsevästi nolasta. Testien p -arvot olivat kolmen desimaalin tarkkuudella nollia.

Taulukko 2. Kahden vuoden ikäisen päällysteen urasyvyyden parametrit yhdeksältä yhtenäiseltä tieosuudelta. Taulukon ELY:t ovat 1 Uusimaa, 2 Turku, 3 Kaakkois-Suomi ja 4 Häme.

Tie	ELY	Osuiden pit. [km]	KVL	Toimenpide (vuosi)	2 v urasyvyys			AR-malli	
					min [mm]	ka [mm]	max [mm]	$\hat{\phi}$	$\hat{\sigma}$ [mm]
8	2	10.4	4693	MPKJ (2003)	2.5	5.6	9.1	0.61	0.91
10	2	27	3643	MPKJ (2001)	3.6	5.3	7.7	0.63	0.58
11	4	4.6	6259-7019	REM (2001)	3.7	5.7	7.1	0.79	0.55
12	2	15.0	5098-6286	MPKJ (2003)	2.9	5.7	11.3	0.76	0.95
12	2	18.1	4513-6348	MP/MPKJ (2003)	3.2	5.5	7.9	0.52	0.73
13	3	5.4	3061-3440	MP (2003)	2.6	5.6	7.2	0.87	0.70
25	1	13.1	3967	MP (2001)	3.2	5.1	7.9	0.73	0.92
65	4	20.6	3046-3254	MPKJ (2002)	2.0	3.9	6.4	0.49	0.74
132	1	3.8	3210	LTA (2002)	3.0	4.8	6.9	0.60	0.89

Aineistosta saatavat parametriestimaatit $\hat{\phi}$ ja $\hat{\sigma}$ riippuvat uraprofiilin muodosta. Koska tiet urautuvat eri tavalla, ei ole olemassa yksiä yleispäteviä parametreja. Lähtöprofiilimallissa urasyvyyden odotusarvo määrää tason, jonka ympärillä urasyvyys vaihtelee, ja parametrit ϕ ja σ puolestaan määräävät uraprofiilin luonteen. Tavoitteena on tuottaa luonteeltaan todellisia vastaavia uraprofiileja, jolloin syvän ja matalan uran kohdat ovat oikean syvyyksiä, pituisia ja uskottavan välimatkan päässä toisistaan ja urasyvyyden jakauma vastaa todellista. Koska ei ole olemassa yksiä yleispäteviä parametreja, täytyy simuloinneissa käyttää useampaa eri parametriparia ja katsoa, miten parametrit vaikuttavat simulointituloksiin.

3.3.3 AR-mallin diagnostiset tarkistukset

AR(1)-mallin pätevyyttä tutkittiin diagnostisin tarkistuksin, jotka perustuvat mallin residuaalien eli jäännöstermien tutkimiseen. Tavoitteena on todeta, että mallin residuaalit ovat valkoista kohinaa. Tutkimuksen kohteena olivat siis taulukon 2 osuuksille sovitettujen AR-mallien residuaalit.

Residuaalit lasketaan ennustamalla mallilla satametrinen urasyvyyden poikkeama keskiarvosta käyttäen lähtötietona edellisen satametrinen todellista poikkeamaa. Kun todellisesta arvosta vähennetään ennuste, saadaan jäännöstermi eli residuaali. Residuaalien tulisi olla normaalisti jakautunutta valkoista kohinaa. Residuaalien arvot eivät saa siis riippua esimerkiksi ennusteiden arvoista tai paaluluvusta, eikä niissä saa olla autokorreloituneisuutta.

Residuaaleja tutkittiin graafisesti piirtämällä residuaalit paaluluvun sekä ennusteiden funktioina. Lisäksi piirrettiin Q-Q -kuvat ja autokorrelaatiokuvaajat ja residuaalien normaalisuutta testattiin Shapiron-Wilkin testillä. Residuaaleissa ei havaittu autokorreloituneisuutta, eikä residuaalien arvoissa näkynyt riippuvuutta ennusteiden arvoista. Kahden osuuden residuaalit eivät olleet normaalisti jakautuneita. Taulukossa 2 ensin mainitulla tien 12 osuudella sekä tien 13 osuudella oli molemmilla muutama satametrinen, joiden urasyvyys poikkesi ylöspäin erittäin paljon edellisen satametrisen urasyvyydestä. Tällöin muodostui arvoltaan niin suuria residuaaleja, että normaalijakauma tuottaisi sellaisia vain erittäin pienellä todennäköisyydellä. Tien 12 taulukossa 2 toisena mainitulla osuudella KVL vaihtelee melko voimakkaasti. Tämä näkyy urasyvyyden sekä residuaalien riippuvuutena paaluluvusta. Kokonaisuutena residuaalitarkastelut osoittivat, että AR-malli selittää urasyvyyttä riittävän hyvin. KVL:n vaihtelut osuuden sisällä tulee huomioida uraprofiileja tuottaessa.

Päädyttiin siis siihen, että kahden vuoden ikäisen päällysteen uraprofiileja voidaan riittävällä tarkkuudella mallintaa AR(1)-prosessina. Tähän päätelmään tultiin tutkimalla todellisten yhtenäisten osuuksien uraprofiileja, uraprofiilien auto- ja osittaisautokorrelaatiofunktioita sekä mallien residuaaleja.

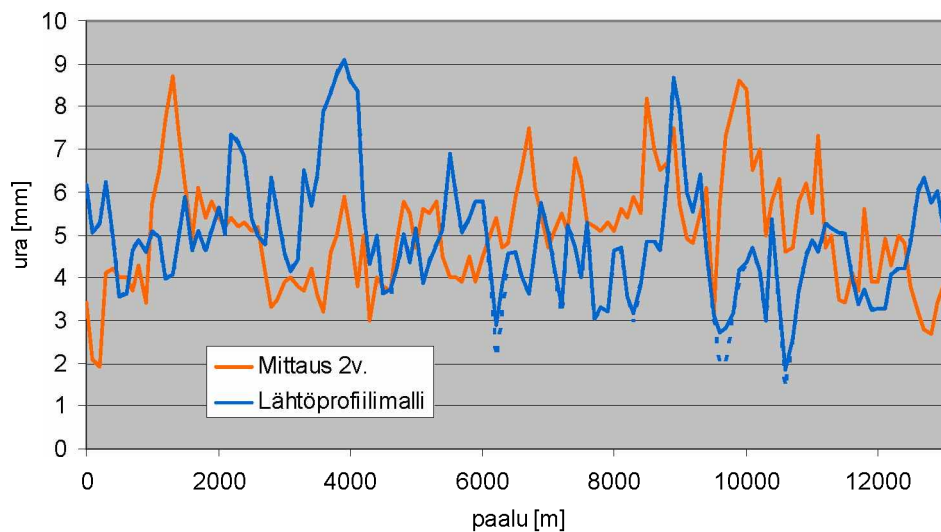
3.3.4 Minimiasyvyyskorjaus

AR-prosessi on stokastinen prosessi, joka saattaa tuottaa jopa negatiivisia urasyvyyksiä. Siksi lähtöprofiilimalliin kuuluu osa, joka estää tiettyä rajaa pienempien urasyvyyksien syntymisen kahden vuoden uraan. Tämä raja on normaalijakaumaa noudattava satunnaismuuttuja, joka arvotaan erikseen jokaiselle satametrille, jolloin ei pääse syntymään urasyvyydeltään aivan tasaisia kohtia. Taulukon 2 perusteella näyttäisi siltä, että minimiasyvyyksillä ei ole voimakasta riippuvuutta KVL:stä. Tässä työssä minimiasyvyys noudattaa normaalijakaumaa parametreilla $\mu = 3.5$ mm ja $\sigma = 0.2$ mm. Mitä suurempi urasyvyyden odotusarvo on ja mitä homogeenisemmin tie urautuu, sitä harvemmin tätä minimiasyvyyttä sovelletaan uraprofiileja luotaessa.

3.3.5 Esimerkkejä lähtöprofiilimallin toiminnasta

Seuraavaksi esitellään parametrien ϕ ja σ vaikutusta lähtöprofiilimallin tuottaman uraprofiilimallin luonteeseen sekä näytetään, kuinka mallin tuottamat uraprofiilit vastaavat luonteeltaan todellisia profiileja. Tämän luvun tarkasteluissa on mukana minimiasyvyyskorjaus.

Kuvassa 7 on esitetty taulukossa 2 mainitun valtatie 25 osuuden mitattu uraprofiili kahden vuoden kuluttua päällystyksestä. Toinen käyrä on lähtöprofiilimallilla luotu uraprofiili, jossa AR-mallin parametreina on käytetty kyseiselle osuudelle mittausaineistosta estimoituja parametreja ja urasyvyyden odotusarvona todellista keskimääräistä urasyvyyttä (taulukko 2). Katkoviivalla on merkitty kohdat, joissa mallilla luotu lähtöprofiili olisi kulkenut ilman minimiasyvyyskorjausta.



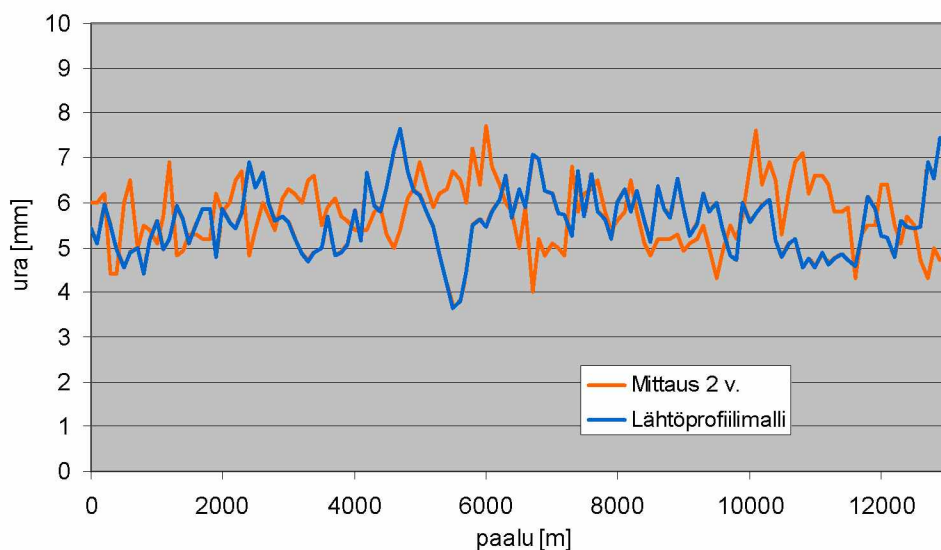
Kuva 7. Mitattu urasyvyys valtatie 25 13.1 kilometrin osuudelta kahden vuoden kuluttua päällystyksestä sekä yksi lähtöprofiilimallilla luotu realisaatio. AR-mallin parametrit on estimoitu mittausaineistosta, ja ne ovat $\phi = 0.73$, $\sigma = 0.92$ mm ja $E(ura) = 5.1$ mm. Katkoviivalla on merkitty kohdat, joissa käyrä olisi kulkenut ilman minimiurasyvyyskorjausta.

Kuvan realisaation voidaan katsoa vastaavan luonteeltaan todellista, mitattua uraprofiilia. Syvimmät urasyvytydet ovat suunnilleen yhtä syviä ja matalimmat urat yhtä matalia.

Huomaa, että kyseessä on vain yksi realisaatio lähtöprofiilimallista. Toinen realisaatio olisi siten erilainen, että esimerkiksi urasyvytydeltään syvimmät kohdat olisivat toisessa kohdassa. Uraprofiilin luonne pysyy useimmissa realisaatioissa samansuuntaisena. Joissakin realisaatioissa esiintyy vielä syvempiä kohtia, ja toisissa profiili jää taas melko latteaksi. Simulointi tasoittaa näitä eroja toistojen kautta.

Kuvassa 8 on esitetty vastaavasti osuus valtatieltä 10. Tarkasteltu osuus on todellisuudessa 27 kilometrin mittainen, mutta siitä on valittu kuvaan ensimmäiset 13.1 km, jotta sitä olisi helppo vertailla tien 25 kuvan kanssa (kuva 7).

Kuvassa 8 AR-mallin parametrit ovat pienemmät; varsinkin kohinan keskihajonta σ on merkittävästi pienempi. Tässäkin lähtöprofiilimallin luoma uraprofiili vastaa luonteeltaan mitattua uraprofiilia. Urasyvyys ei poikkeile yhtä suuresti odotusarvostaan kuin kuvassa 7. Siksi minimiurasyvyyskorjausta ei tarvittu, vaan urasyvyys pysyy muutenkin uskottavan suurena.



Kuva 8. Mitattu urasyvyys valtatie 10 13.1 kilometrin osuudelta kahden vuoden kuluttua päällystyksestä sekä yksi lähtöprofiilimallilla luotu realisaatio. AR-mallin parametrit on estimoitu mittausaineistosta, ja ne ovat $\phi = 0.63$, $\sigma = 0.58$ mm ja $E(\text{ura}) = 5.3$ mm. Minimiurasyvyyskorjausta ei tässä tarvittu.

Esimerkkien perusteella voidaan todeta, että parametrit ϕ ja σ vaikuttavat selvästi mallin tuottaman uraprofiilin luonteeseen. Valitsemalla parametrit sopivasti saadaan luonteeltaan todenmukaisia kahden vuoden ikäisen päällysteen uraprofiileja.

3.3.6 Kahden vuoden ikäisen päällysteen urasyvyyden odotusarvo

AR-mallin parametrit ϕ ja σ kuvastavat kahden vuoden ikäisen päällysteen urasyvyyden vaihtelua odotusarvon ympärillä. Seuraavaksi esitetään, miten tämä odotusarvo määräytyy, ja miten se vaikuttaa keskimääräiseen urasyvyyteen tulevina vuosina.

Kahden vuoden ikäisen päällysteen urasyvyyden odotusarvo riippuu tämän työn mallissa ainoastaan satametrinen KVL:stä. Urasyvyyden odotusarvo määritetään lineaarisesta regressiomallista, jossa selittäjänä on satametrinen KVL. Malli määritetään erikseen remix-toimenpiteille sekä varsinaisille uudelleenpäällystystoimenpiteille. Työmenetelmäkoodit on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Lähtöprofiilimallin toimenpidetyypit.

Toimenpidetyyppi mallissa	Lyhenne	Kattaa työmenetelmät (koodit)
Remix	REM	REM, REM+
Uudelleen päällystäminen	LTA/MP	LTA, MP, MPK, MPKJ

Mallien sovittamisessa käytettiin aineistona vuosina 2001–2006 päällystettyjen satametrinen kahden vuoden kuluttua päällystämisestä mitattuja urasyvyyksiä. Mittaukset oli siis tehty vuosina 2003–2008. Teiden päällyste oli asfalttibetonia, KVL 3 000–9 000 ja ELY 1–4. Yli 20 millimetrin urasyvyydet suodatettiin pois poikkeavina havaintoina, sillä näin suuret urasyvyydet johtuvat joko mittausvirheestä tai pahasta

deformaatiosta. LTA/MP mallissa havaintoja oli noin 8 000 satametristä ja REM-mallissa noin 7 000 satametristä.

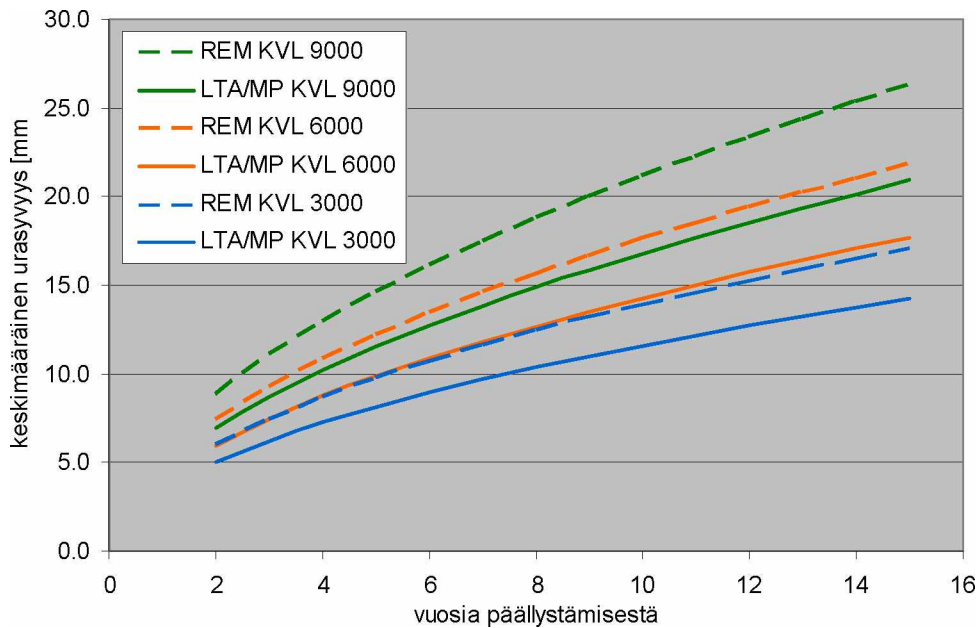
LTA/MP-mallin selitysaste (R^2) oli 0.04 ja REM-mallin 0.10, eli selitysasteet olivat hyvin matalia. Huomattavaa on, että nämä selitysasteet kertovat siitä, kuinka hyvin KVL selittää yksittäisen satametrisen urasyvyyttä kahden vuoden kuluttua päällystyksestä. Tässä malleilla kuitenkin selitetään yhtenäisen osuuden keskimääräistä urasyvyyttä, missä ne onnistuvat huomattavasti paremmin.

Regressiomalli olisi voitu muodostaa jakamalla satametrisdata yhtenäisiin osuuksiin, laskemalla osuuksille urasyvyyden keskiarvot ja estimoimalla mallit osuuskien pituuksilla painotettujen keskiarvojen pohjalta. Tällöin olisi päädytty samoihin malleihin, mutta olisi saatu tietoon mallien selitysasteet keskiarvon suhteen. Tämä olisi vaatinut saatavaan hyötyyn nähden runsaasti ylimääräistä työtä, joten se jätettiin tekemättä. Regressiomallien antamia urasyvyyksiä on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Regressiomallien antamia urasyvyyden odotusarvoja kahden vuoden kuluttua päällystyksestä kolmella eri KVL:llä.

KVL	3000	6000	9000
LTA/MP	5.0 mm	6.0 mm	7.0 mm
REM	6.0 mm	7.4 mm	8.9 mm

Urauttamismalli toimii siten, että kahden vuoden ikäisen päällysteen urasyvyys heijastuu urasyvyyden kehitykseen koko päällysteen eliniän ajan. Tarkastellaan seuraavaksi, miten *keskimääräiset* urasyvyydet kehittyvät ajan kuluessa. Kuvassa 9 on esitetty ennustemallin antamat oletusarvoiset keskimääräisen urasyvyyden kehitykset regressiomallien antamalla kahden vuoden ikäisen päällysteen urasyvyyksillä. Taulukon 4 urasyvyydet ovat siis kuvaajien lähtöpisteinä kahden vuoden kohdalla.



Kuva 9. Ennustemallin antamat keskimääräisen urasyvyyden odotusarvoiset kehitykset regressiomallien antamalla kahden vuoden ikäisen päällysteen keskimääräisillä urasyvyyksillä.

Erot kahden vuoden ikäisen päällysteen urasyvytydessä aiheuttavat suurimmat erot urautumisnopeuteen. Esimerkiksi KVL:n 6 000 tie urautuu LTA/MP-toimenpiteen jälkeen keskimäärin lähes samaa vauhtia kuin KVL:n 3 000 tie, jolle on tehty REM-toimenpide. Ennustemallin (kaava 12) logaritmitermi aiheuttaa pienen eron urautumisnopeuteen.

Odotusarvoisiin urasyvyysiksi lisätään vielä sopiva hajonta kertomalla regressiomallin tuottamia urasyvyysiksi normaalisti jakautuneilla kertoimilla. Tässä työssä käytetään pääosin parametreja $\mu = 1$ ja $\sigma = 0.2$. Keskihajonnalla 0.2 kertoimista 68 % on välillä 0.8–1.2 ($[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$). Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi LTA/MP-toimenpiteen jäljiltä olevista KVL:n 3 000 teistä 68 %:ssa kahden vuoden ikäisen päällysteen uran odotusarvo on 4 ja 6 millimetrin välillä.

Regressiomalli vaikuttaa riittävältä tämän työn tarpeisiin. Verifiointin yhteydessä tutkitaan kiertoaikojen ja peittoprosenttien avulla, onko mallin aikaansaama keskimääräinen urautumisnopeus oikea, jolloin voidaan tehdä lopulliset päätelmät mallin sopivuudesta.

3.4 Urauttamismalli kokonaisuutena

Ennustemalli ja lähtöprofiilimalli muodostavat yhdessä urauttamismallin, joka toimii seuraavasti:

- 1) Lasketaan lähtöprofiilimallin regressiomallilla kahden vuoden ikäisen päällysteen urasyvyyden odotusarvo $E(ura(t = 2 v))$.
- 2) Arvotaan uraprofiili $ura(x, t = 2 v)$ lähtöprofiilimallin AR-mallilla odotusarvon ympärille.

- 3) Lasketaan ennustemallilla satametrinen urasyvyys seuraavalle vuodelle:

$$ura(x, t) = ura(x, t-1) + \varepsilon \times \Delta ura(x, t).$$

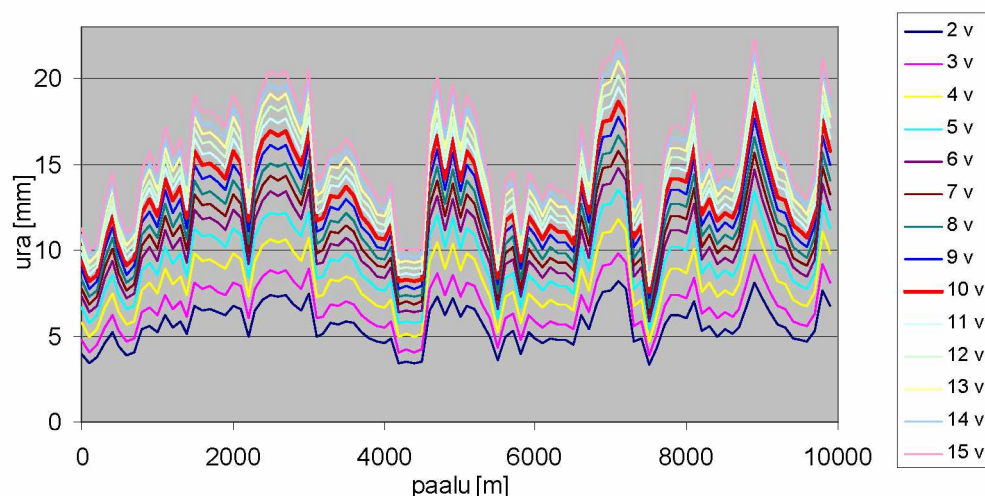
Kohtaa 3 toistetaan, kunnes kohde päällystetään uudelleen.

Lähtöprofiilimalli tuottaa kahden vuoden ikäisen päällysteen uraprofiileja, eli simuloinnin lähtötilana on kaksi vuotta sitten päällystetty yhtenäinen tieosuus. Tien odotusarvoinen urasyvyys lasketaan valitun KVL:n perusteella regressiomallilla ja skaalataan normaalijakautuneella satunnaisella kertoimella (kohta 1). Tämä luku asettaa tason, jonka ympärillä uraprofiili vaihtelee. AR-mallilla arvotaan uraprofiili tämän tason ympärille käyttäen valittuja parametreja φ ja σ (kohta 2).

Ennustemalli lähtee urauttamaan tietä tämän lähtöprofiilin ja KVL:n perusteella (kohta 3). Tässä satunnaisuutta tuovat normaalijakautuneet ε -kertoimet, jotka vaikuttavat vuosimuutoksiin. Ennustemalli tuottaa kullekin satametrille kahden vuoden urasyvyyden perusteella urasyvyyden muutoksen seuraavalle vuodelle, jota skaalataan kertoimella ε , joka on koko osuudelle sama. Nyt on saatu urasyvyys kolmannelle vuodelle. Kolmannen vuoden urasyvyyttä taas käytetään laskettaessa neljännen vuoden urasyvyyttä jne.

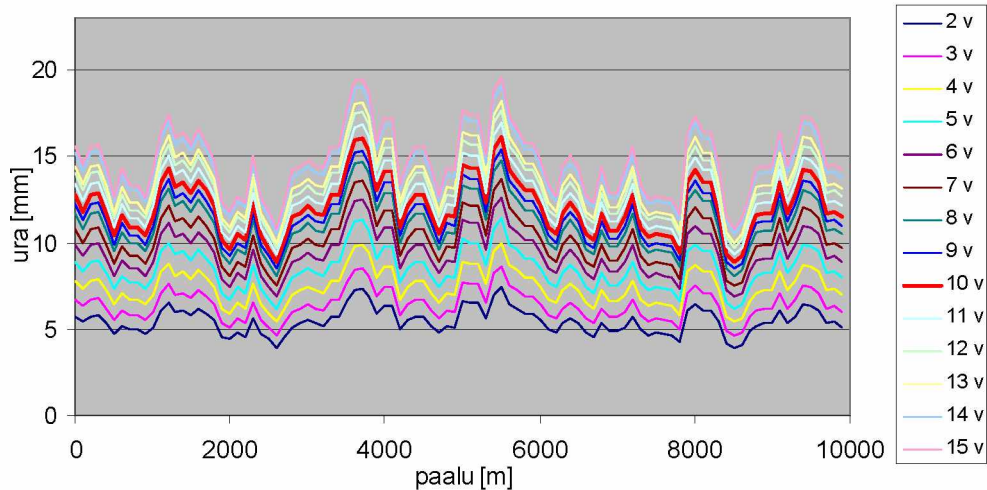
Toinen vaihtoehto on käyttää lähtöprofiilina todellisen tien uraprofiilia. Valittu osuus voi olla minkä pituinen tahansa, ja päällyste voi olla minkä ikäinen tahansa. Tiellä voi olla eri-ikäisiäkin päällysteitä ja satametrinen KVL:t voivat vaihdella osuuden sisällä. Tässä työssä aiemmin käytettyä termistöä käyttäen lähtötilan ei tarvitse siis tällöin olla ns. yhtenäinen tieosuus.

Kuvassa 10 on esitetty urautumismallin toimintaa, kun tien annetaan urautua vapaasti ilman toimenpiteitä. Kuvassa on uraprofiilit 2–15 vuoden ikäiselle päällysteelle. Kysessä on yksi satunnainen realisaatio urauttamismallista kymmenen kilometrin mittaiselle osuudelle. AR-mallin parametrit ovat $\varphi = 0.8$ ja $\sigma = 0.9$ mm. Tielle on tehty LTA/MP-toimenpide ja KVL on 4 500. Hieman paksummalla on korostettu urasyvyys 10 vuoden kuluttua päällystyksestä. Suurimmat urasyvydet ovat tällöin noin 18 mm ja matalimmat noin 8 mm; tie urautuu hyvin epähomogeenisesti.



Kuva 10. Vapaa urautuminen: yksi realisaatio urauttamismallista. LTA/MP, KVL 4 500, $\varphi = 0.8$ ja $\sigma = 0.9$ mm.

Kuvassa 11 on toinen realisaatio. Tilanne on muuten sama, mutta AR-mallin parametrit ϕ ja σ ovat $\phi = 0.7$ ja $\sigma = 0.6$ mm. Kymmenen vuoden ikäisen päällysteen suurimmat urasyvyyydet ovat hieman yli 15 millimetriä ja pienimmät noin 9 millimetriä. Päällyste urautuu homogeenisemmin kuin kuvassa 10.



Kuva 11. Vapaa urautuminen: yksi realisaatio urauttamismallista. LTA/MP, KVL 4 500, $\phi = 0.7$ ja $\sigma = 0.6$ mm.

3.5 Urauttamismallin verifiointi

Seuraavaksi tutkitaan, vastaako urauttamismallin tuottama käytös päällysteen todellista urautumista, eli verifioidaan urauttamismallin toimintaa. Asiaan on kaksi lähestymistapaa: luvussa 3.5.1 urauttamismallin tuottamia uraprofiileja vertaillaan mitattuihin uraprofiileihin ja luvussa 3.5.2 vertaillaan mallin tuottamia kiertoaikoja ja peittoprosentteja aikaisempien selvitysten tuloksiin.

3.5.1 Vertailu todellisiin uraprofiileihin

Seuraavaksi tuotetaan urauttamismallilla uraprofiileita samaan tapaan kuin kuvissa 10 ja 11 ja vertaillaan niitä samanikäisten päällysteiden todellisiin uraprofiileihin. Tähtäyksinä on tutkia, vastaavatko urauttamismallilla tuotetut uraprofiilit todellisia uraprofiileja tien lähestyessä uudelleenpäällystysikää. Tämä on tärkeää simulointitulosten uskottavuuden ja luotettavuuden kannalta.

Vertailuun otettiin 5–10 vuoden ikäisten päällysteiden uraprofiileita. Aineistosta poimittiin PMSPr:n vuoden 2011 lopun uraennuste, eli muuttuja *ura_nykytila*, joka on laadittu vuoden 2010 mittausten perusteella. Tämän uraennusteen katsotaan tässä tarkastelussa edustavan todellista urasyvyyttä.

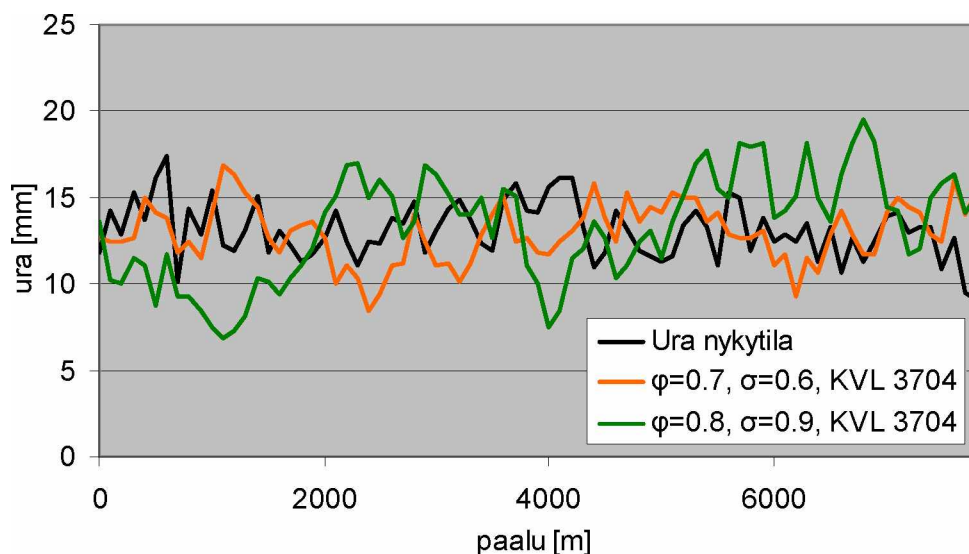
Vertailuun ei otettu yli 10 vuoden ikäisiä päällysteitä, sillä sen ikäisiä päällysteitä voidaan pitää tutkituilla liikennemäärillä mahdollisesti jo keskimääräistä paremmin kestävinä. Vertailua haluttiin tehdä nimenomaan melko tavanomaista vauhtia urautuvilla kohteilla. Tosin vertailuun osui kuitenkin kaksi erittäin nopeasti urautunutta osuutta sekä kaksi erittäin hitaasti urautunutta osuutta. Vertailu toteutettiin siten, että urauttamismallilla yritettiin saada aikaan mahdollisimman hyvin luonteeltaan todellista

uraprofiilia vastaava realisaatio. Realisaatioita arvottiin muutama, ja niistä valittiin parhaiten sopiva. ELY:istä 1–4 poimittiin vertailuun yhteensä yhdeksän yhtenäistä tieosuutta.

Vertailussa käytettiin enimmäkseen kahta AR-mallin parametriparia, jotka olivat esillä edellisessäkin luvussa. Hyvin epähomogeenisesti urautuvaa tietä edustavat parametrit $\phi = 0.8$, $\sigma = 0.9$ mm ja hieman homogeenisemmin urautuvaa tietä parametrit $\phi = 0.7$, $\sigma = 0.6$ mm. Mallin kohinatermit asetettiin ykkösiksi, jolloin vältettiin se, että vertailuun olisi tullut kovasti mallin odotusarvoisesta käyttäytymisestä poikkeavia realisaatioita. Näin toimittiin, koska haluttiin tutkia mallin tavanomaista käyttäytymistä, ei erikoistapauksia.

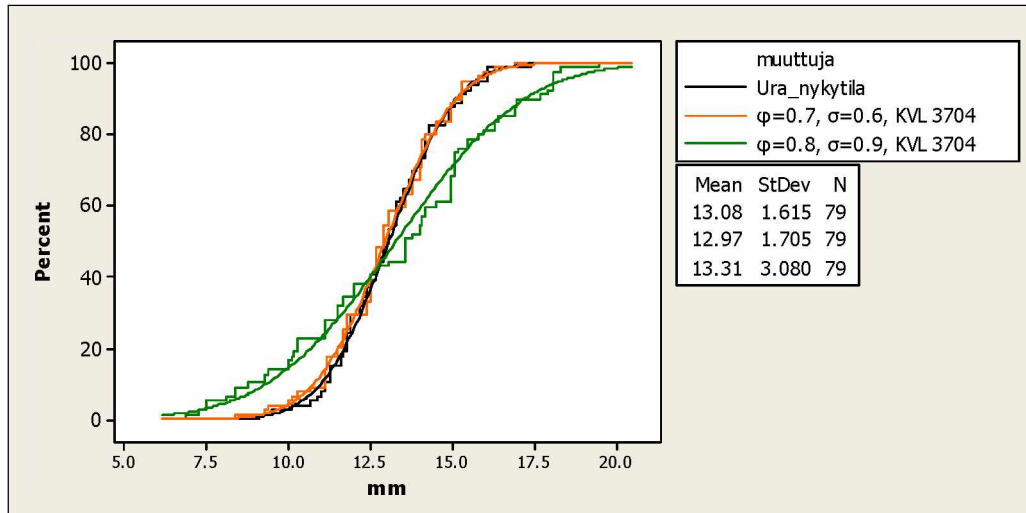
Jos malli tuotti keskiarvoltaan selvästi liian matalan uraprofiilin, säädettiin mallin KVL-parametria ylöspäin. Vastaavasti, jos uraprofiili oli keskiarvoltaan selvästi liian suuri, säädettiin KVL-parametria alaspäin. Näin saatiin samalla tietää, mitä mallin KVL-parametrin arvoa todellisen osuuden urautumisnopeus vastasi.

Kuvassa 12 on esitetty valtatie 23 uraprofiilia sekä kaksi urauttamismallilla toteutettua realisaatiota. Parametrit $\phi = 0.7$ ja $\sigma = 0.6$ mm antavat paremman tuloksen. Suurimmat ja pienimmät urasyvyyydet ovat hyvin lähellä todellisia, ja enimmäkseen urasyvyys on välillä 10–15 millimetriä.



Kuva 12. Valtatie 23 todellista sekä mallilla tuotettua uraprofiilia 8 vuoden kulluttua REM-toimenpiteestä. Osuuden pituus on 7.9 km ja KVL 3 704.

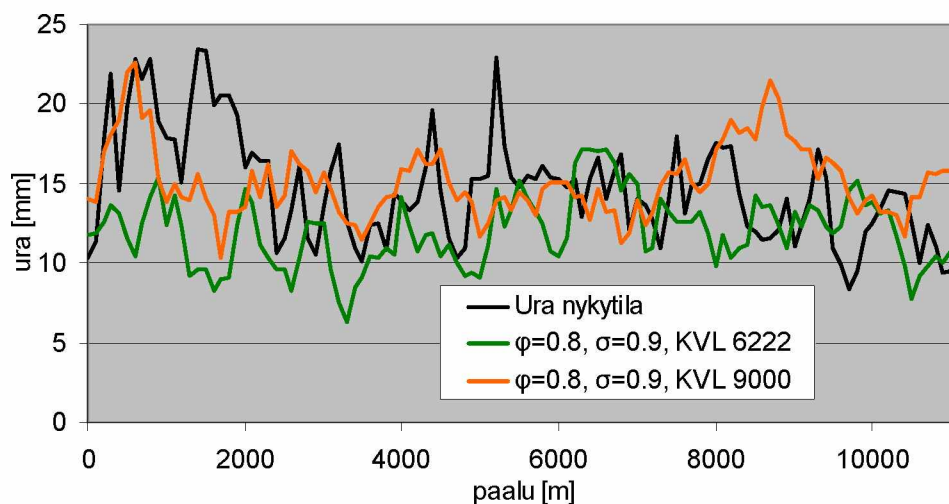
Kuvassa 13 on esitetty kuvan 12 uraprofiilien kertymäfunktioit sekä niihin sovitettujen normaalijakaumien kertymäfunktioit. Kuvassa ovat näkyvissä myös keskiarvot sekä keskihajonnat. Parametreilla $\phi = 0.7$ ja $\sigma = 0.6$ mm tuotettu realisaatio vastaa hyvin todellisen profiilin luonnetta, eli urasyvyysien jakaumat ovat varsin samanlaiset.



Kuva 13. Valtatien 23 osuuden, kuvan 12 uraprofiilien kertymäfunktiot, keskiarvot ja keskihajonnat.

Kuvasta 13 nähdään, että tarkastellun tien 23 osuuden urasyvyyden keskiarvo oli 13.08 mm. Todellisen liikenteen mukainen KVL-parametri 3 704 tuotti keskiarvoltaan oikean syvistä uraa. Myös luvun 3.3.6 kuvasta 9 nähdään, että tarkastellun osuuden keskimääräinen urasyvyys vastaa hyvin mallin ennustamaa.

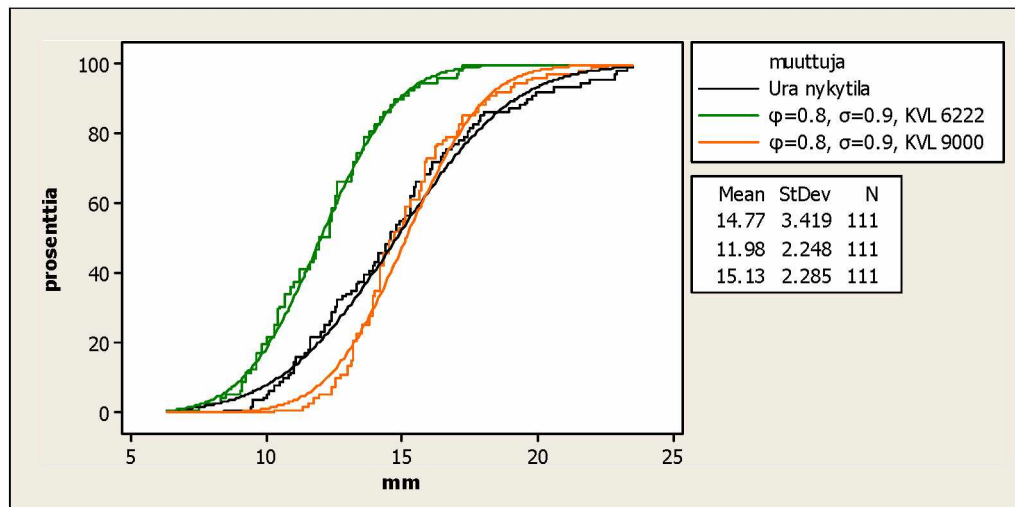
Kuvassa 14 on esitetty valtatie 8 uraprofiilia sekä kaksi urauttamismallilla toteutettua realisaatiota. Parametrit $\phi = 0.8$ ja $\sigma = 0.9$ mm ovat melko hyvät. Keskimääräistä vuorokausiliikennettä täytyi korjata todellisesta arvostaan, 6 222 ajoneuvosta, 9 000 ajoneuvoon, jotta malli tuotti keskiarvoltaan riittävän syvää uraa. Kyseinen osuus on siis urautunut ennustetta nopeammin. Syvimmät urat ovat suunnilleen yhtä syviä, mutta profiili näyttää erilaiselta. Todellisessa profiilissa on yksittäisiä, uraltaan syviä kohtia, jotka näkyvät kuvassa terävinä piikkeinä.



Kuva 14. Valtatie 8 todellista sekä mallilla tuotettua uraprofiilia 5 vuoden kuluttua REM-toimenpiteestä. Osuuden pituus on 11.1 km ja KVL 6 222.

Kuvassa 15 on esitetty valtatie 8 uraprofiilien kertymäfunktioita. Realisaatiossa, jossa KVL oli 9 000, on oikea keskimääräinen urasyvyys. Tämän voi todeta myös luvun 3.3.6 kuvasta 9. Mallin perusteella keskimääräisen urasyvyyden 5 vuotta REM-toimenpiteen jälkeen pitäisi olla noin 12.5 mm tielle, jonka KVL on 6 222 ja noin 15 mm tielle, jonka KVL on 9 000.

Todellisen uraprofiilin kertymäfunktio kuitenkin nousee loivemmin, eli siinä on enemmän urasyvyydeltään suuria ja urasyvyydeltään pieniä satametrisiä. Kun keskimääräistä vuorokausiliikennettä nostettiin arvosta 6 222 arvoon 9 000, voidaan mallin katsoa kuitenkin toimivan tyydyttävästi. Kyseinen osuus urautui siis keskimääräistä nopeammin.



Kuva 15. Valtatie 8 osuuden, kuvan 14 uraprofiilien kertymäfunktioita, keskiarvot ja keskihajonnat.

Taulukossa 5 on esitetty vertailussa mukana olevat osuudet. Kaikilla osuuksilla oli AB-päällyste. Taulukossa on esitetty erikseen todellinen KVL sekä urauttamismallin parametrina käytetty KVL. Mallin antamaa uraprofiilia on verrattu todelliseen käyttäen profiilien kuvaajia ja kertymäfunktioita. Profiileja vertailtaessa on katsottu muun muassa suurimpia ja pienimpiä urasyvyyksiä sekä urasyvyydeltään suurten kohtien lukumäärää. Sopivuutta on arvioitu karkealla asteikolla hyvä, tyydyttävä, huono.

Taulukko 5. Vertailussa käytetyt osuudet. Mallin sopivuudella tarkoitetaan käytetyillä parametreilla (ϕ , σ , KVL) sovitettujen realisaatioiden sopivuutta todellisen osuuden uraprofiiliin. Taulukon ELY:t ovat 1 Uusimaa, 2 Turku, 3 Kaakkois-Suomi ja 4 Häme.

Tie	ELY	Osuuden pit. [km]	KVL	Toimenpide (vuosi)	Pääll. ikä [v]	AR-malli			Mallin sopivuus
						ϕ	σ [mm]	KVL	
8	2	11.1	6222	REM (2006)	5	0.8	0.9	9000	Tyyd.
8	2	12.3	6043	REM (2006)	5	0.6	0.6	5500	Hyvä
10	2	28.1	3297	MPKJ (2001)	10	0.7	0.6	6000	Hyvä
23	2	7.9	3704	REM (2003)	8	0.7	0.6	3704	Hyvä
41	2	13.1	3463	REM (2003)	8	0.7	0.6	3463	Tyyd.
52	1	9.6	3717-4311	REM (2003)	8	0.7	0.6	4000	Hyvä.
57	1	4.9	3600	REM (2003)	8	-	-	-	Huono
170	3	5.5	3317	REM (2003)	8	0.7	0.6	1800*	Tyyd.
325	4	12.2	4139	MP (2004)	7	0.7	0.6	4139	Tyyd.

* Mallissa päällystetyyppinä LTA/MP

Taulukon osuudet eivät ole olleet esillä aiemmin tässä työssä, lukuun ottamatta tien 10 osuutta.

Havaintoja ja kommentteja taulukon 5 kohteista:

- Mukana oli kaksi osuutta valtatieltä 8. Osuudet sijaitsivat noin 55 kilometrin päässä toisistaan, ja niille on tehty REM-toimenpide samana vuonna. Kuvassa 14 esitelty osuus urautui selvästi ennustettua nopeammin ja toinen osuus hieman ennustettua hitaammin. Toisella osuudella saatiin mallilla tuotettua erittäin hyvin sopiva uraprofiili muuttamalla hieman ϕ :n arvoa. Kyseisenä parametrina käytettiin 0.7 sijasta arvoa 0.6.
- Valtatien 10 osuuden kahden vuoden ikäisen päällysteen urasyvyydelle määritettiin luvussa 3.3.2 AR-parametriestimaatit $\hat{\phi} = 0.63$ ja $\hat{\sigma} = 0.58$. Parametriestimaatit eivät juuri poikkea tässä käytetyistä parametreista, mikä vahvistaa kuvaa siitä, että uraprofiilin luonne näkyy hyvin jo kahden vuoden ikäisestä päällysteestä. Urauttamismallin tuottama 10 vuoden uraprofiili vastasi luonteeltaan hyvin todellista uraprofiilia, mutta tie on urautunut paljon ennustettua nopeammin. KVL-parametri piti nostaa arvoon 6 000, jotta uran keskiarvo oli riittävän suuri.
- Valtatien 23 osuudelle malli istui hyvin, kuten kuvista 12 ja 13 näkyi. Kantatien 41 osuudelle malli istui muuten hyvin, mutta todellisessa uraprofiilissa oli muutama yksittäinen uraltaan lähes 18 mm satametrisen, jollaisia urauttamismalli ei tuottanut. Tien 52 osuudelle malli istuu hyvin; korkeimmat ja matalimmat urasyvytydet täsmäivät erittäin tarkasti.
- Kantatieltä 57 ja seututieltä 170 tarkasteluun otetut osuudet urautuivat huomattavasti mallin ennustamaa hitaammin. Molemmille on tehty REM-toimenpide vuonna 2003, ja teiden KVL:t ovat 3 317 ja 3 600 ajoneuvoa vuorokaudessa. Tien 57 osuuden urasyvyyden keskiarvo kahdeksan vuoden kuluttua päällystyksestä on 7.6 mm ja tien 170 osuuden 8.9 mm. Tien 170 osuudelle

le malli saadaan täsmäämään laskemalla KVL tasolle 1 800 ja vaihtamalla päällystetyypiksi LTA/MP, mikä on keinotekoinen tapa hidastaa urautumista mallissa. Tien 170 osuuden urautumisnopeus on siis ollut huomattavasti odotettua hitaampaa. Keskimääräistä urasyvyyttä 8.9 mm voi vertailla kuvan 7 ennusteisiin. Tien 57 osuuden urautuminen on ollut niin hidasta, että malli toimi sille huonosti.

- Tieltä 325 tarkastelussa olleelle osuudelle malli toimi pääasiassa hyvin. Lähes kaikkien satametrinen urasyvyys on sekä mallilla että todellisuudessa 7 ja 15 millimetrin välissä. Todellisessa uraprofiilissa on kuitenkin kaksi perättäistä satametristä, joiden urasyvyys ovat 17.5 ja 18.9 mm. Tällaisia muusta tasta näin radikaalisti poikkeavia, yksittäisiä piikkejä malli ei juuri tuota.

Lähes kaikilla tutkituilla teillä AR-mallin parametrit $\phi = 0.7$ ja $\sigma = 0.6$ tuottivat parhaan tuloksen. Epähomogeenisemmän urautumisen aiheuttavilla parametreilla $\phi = 0.8$ ja $\sigma = 0.9$ mm tuotetuissa realisaatioissa oli lähes poikkeuksetta liikaa vaihtelua urasyvytydessä. Toisaalta urasyvytydeltään hyvin epähomogeeniset tiet päällystetään uudelleen aikaisemmin kuin homogeenisemmin urautuvat tiet, koska epähomogeenisesti urautuvien teiden nopeimmin urautuvat kohdat urautuvat nopeammin kuin homogeenisemmin urautuvilla teillä. Siksi voi olla, että tähän vertailuun osui homogeenisemmin urautuvia osuuksia. Siksi myös parametrit $\phi = 0.8$ ja $\sigma = 0.9$ mm puoltavat paikkaansa tulevissa vertailuissa. Lisäksi teillä 23 ja 325 esiintyi yksittäisiä tai pari peräkkäistä satametristä, joilla oli muuhun osuuteen verrattuna huomattavan syvät urat. Parametreilla $\phi = 0.8$ ja $\sigma = 0.9$ mm ei saavuteta aivan tämän tyyppistä uraprofiilia, vaan uraprofiiliin tulee useampia erittäin syvän uran kohtia, jotka ovat usein myös pidempiä (katso kuvat 10 ja 14). Parametrit $\phi = 0.8$ ja $\sigma = 0.9$ mm voivat kuitenkin olla käyttökelpoiset, kun yritetään päästä kiinni tällaisten yksittäisten syvien kohtien aiheuttamiin ongelmiin. Malli tuottaa tällöin yleensä peräkkäin useamman kuin yhden erittäin syvän uran satametrinen, mutta syvimpien kohtien urasyvyys kuitenkin täsmäävät.

Tämän luvun tarkastelujen perusteella urautumismallin voidaan katsoa onnistuvan kuvaamaan teiden urautumista riittävän hyvin. Useimmiten parametrit $\phi = 0.7$ ja $\sigma = 0.6$ mm tuottivat hyvän tuloksen, mutta parametreja $\phi = 0.8$ ja $\sigma = 0.9$ mm on myös hyvä kokeilla vertailtaessa strategioita simulointimallilla.

3.5.2 Kiertoaajat ja peittoprosentit

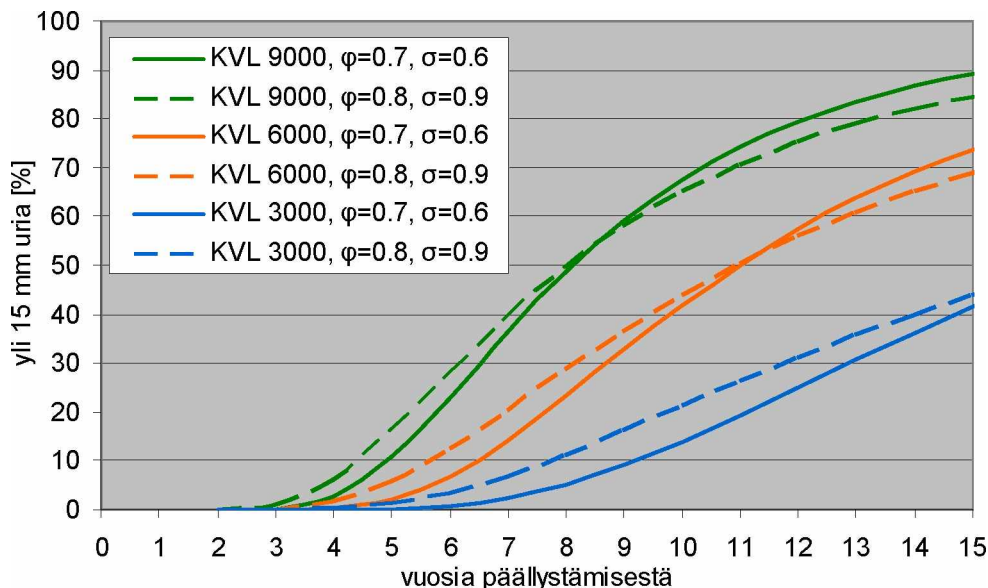
Kiertoaajalla tarkoitetaan päällysteen kestoikää toimenpiteestä seuraavaan päällystystoimenpiteeseen ja peittoprosentilla huonokuntoisten satametrinen osuutta päällystyskohteesta. Urauttamismallin verifioimiseksi tutkittiin, millaisia kiertoaikoja ja peittoprosentteja malli antaa, ja verrattiin niitä aikaisempiin tutkimuksiin. Jos kiertoajat ja peittoprosentit ovat oikean suuntaisia, voidaan ajatella, että malli urauttaa tietä oikealla vauhdilla ja tuottaa sopivan epähomogeenisia uraprofiileja. Päällystysohjelmoinnissa, ja päällysteiden ylläpidossa yleensäkin, kiertoajat ja peittoprosentit ovat luonnollinen tapa hahmottaa päällysteen rappeutumisenopeutta.

Tässä työssä huonokuntoisuuden rajana on pidetty aina 15 mm, eli satametriset, joiden urasyvyys on 15 mm tai enemmän, ovat huonokuntoisia. Todellisuudessa tämä raja pätee teille, joiden nopeusrajoitus on 80 km/h ja KVL yli 1 500. Jos nopeusrajoitus on 100 km/h, on raja todellisuudessa 14 mm. (Tiehallinto, 57/2005)

Peittoprosenttia ja kiertoaikoja tutkittiin simuloimalla. Yhtä 20 kilometrin osuutta urautettiin urauttamismallilla ja urasyvyydeltään yli 15 mm satametrusten osuus tallennettiin. Lähtöprofiili generoitiin lähtöprofiilimallilla. Kuvassa 16 on esitetty urasyvyydeltään 15 mm ylittävien satametrusten osuus ajan funktiona LTA/MP-toimenpiteen jälkeen. Simulointi on tehty kolmella eri KVL:llä ja kahdella eri AR-mallin parametripaarilla.

Epähomogeenisemmän urautumisen aiheuttavilla parametreilla ($\varphi = 0.8$ ja $\sigma = 0.9$ mm) ensimmäisten satametrusten urasyvyys ylittää 15 mm noin vuoden aikaisemmin kuin homogeenisemmän urautumisen parametreilla. Homogeenisemmän urautumisen parametreilla kuvaaja nousee jyrkemmin. Tämä tarkoittaa sitä, että kun ensimmäiset satametriset ylittävät 15 mm rajan, loput tulevat nopeammin perästä.

Ääritapaus olisi täysin tasaisesti urautuva tie, jonka urasyvyys olisi sama jokaisella satametrisellä. Siinä ei olisi lainkaan yli 15 mm uria, kunnes jonain vuonna koko osuus ylittäisi 15 mm rajan. Kuvassa 16 sitä esittäisi askeleen muotoinen kuvaaja.



Kuva 16. Urasyvyydeltään 15 millimetriä ylittävien satametrusten osuus LTA/MP-toimenpiteen jälkeen ajan funktiona eri KVL:illä ja AR-mallin parametreilla.

Jatkuvan viivan ja katkoviivan leikkauskohdassa molemmilla AR-parametripareilla on yhtä paljon yli 15 mm:n uria. Tällöin yli 15 mm urien osuus on hieman yli puolet. Kyseisen vuoden jälkeen homogeenisemmin urautuvalla tiellä on enemmän huonokuntoisia satametrisejä kuin epähomogeenisemmin urautuvalla tiellä. Tämä johtuu siitä, että epähomogeenisemmin urautuvalla tiellä on enemmän myös keskimääräistä hitaammin urautuvia satametrisejä.

REM-toimenpiteelle voitaisiin piirtää vastaava kuvaajat. Niissä ensimmäiset satametriset ylittävät 15 mm urasyvyyden aiemmin ja kuvaajat nousevat jyrkemmin.

Taulukossa 6 on esitetty simuloimalla laskettuja kiertoaika-peittoprosenttipareja, joissa peittoprosentti on päällystyskohteille tyypillisen 30 prosentin tuntumassa. Matlamman KVL:n teiden päällystyskohteilla peittoprosentti on tyypillisesti pienempi ja

suuremman KVL:n kohteilla suurempi. Kahden vasemmanpuoleisen sarakkeen luvut riveillä KVL 3 000, 6 000 ja 9 000 voidaan lukea myös kuvasta 16. Epähomogeenisemmän urautumisen aiheuttavilla parametreilla ($\varphi = 0.8$ ja $\sigma = 0.9$ mm) kiertoajat ovat noin vuoden lyhyemmät kuin homogeenisemmän urautumisen aiheuttavilla parametreilla.

Taulukko 6. Simuloimalla laskettuja kiertoaika-peittoprosenttipareja. Peittoprosentti tarkoittaa tässä urasyvyydeltään 15 mm tai sen ylittävien olevien satametrusten osuutta.

KVL	LTA/MP $\varphi = 0.8, \sigma = 0.9$ mm	LTA/MP $\varphi = 0.7, \sigma = 0.6$ mm	REM $\varphi = 0.8, \sigma = 0.9$ mm	REM $\varphi = 0.7, \sigma = 0.6$ mm
3 000	10 v / 21 % 11 v / 26 %	11 v / 19 % 12 v / 25 %	8 v / 26 %	8 v / 21 % 9 v / 30 %
4 500	9 v / 26 %	10 v / 27 %	6 v / 22 % 7 v / 33 %	7 v / 28 %
6 000	8 v / 29 %	8 v / 23 % 9 v / 33 %	5 v / 22 % 6 v / 35 %	5 v / 17 % 6 v / 32 %
9 000	6 v / 28 %	6 v / 23 % 7 v / 36 %	4 v / 29 %	4 v / 25 %

Keskimääräisiä kiertoaikoja ja peittoprosentteja on arvioitu asiantuntijatyönä PYRO-mallia (päällysteiden ylläpidon rahoitustarpeen optimointi) varten (Mild ym., 2011). Kullekin mallin osaverkolle on arvioitu keskimääräinen uusimisväli, tyypillisen päällystyskohteen peittoprosentti sekä mallin kuntomuuttujien (ura, tasaisuus, vauriot) osuudet peittoprosenteista. Arviot on annettu LTA/MP-toimenpiteelle. Tämän työn urauttamismallin antamia lukuja voidaan verrata PYRO-mallia varten arvioituihin lukuihin.

PYRO-mallin osaverkot AB 6 000 ja SMA 12 000 ovat tämän työn kannalta relevantteimmat. AB 6000 käsittää KVL:n 3 000–6 000 tiet ja SMA 12 000 KVL:n 6 000–12 000 tiet. Voidaan siis katsoa, että PYRO:n AB 6 000 -osaverkkoa vastaa taulukon 6 rivi KVL 4 500 ja SMA 12 000 -osaverkkoa vastaa KVL 9 000 -rivi. Tosin PYRO:ssa oletuksena keskimääräiseltä vuorokausiliikenteeltään yli 6 000 teille on kestävämpi kivimastiksiasfaltti (SMA), kun taas tämän mallin parametreja määritettäessä on keskitytty AB-päällysteisiin teihin.

PYRO:n AB 6 000 -osaverkon keskimääräinen uusimisväli on 9 vuotta, ja peittoprosentti 30, josta uran suhteen huonokuntoisia on 80 %. Uran suhteen peittoprosentti on siis 24 %. SMA 12 000 -osaverkon keskimääräinen uusimisväli on 6 vuotta ja peittoprosentti uran suhteen noin 30 %.

PYRO-mallin osaverkko AB 3 000 kuvaa KVL:n 1 000–3 000 teitä. Tämän osaverkon keskimääräiseksi uusimisväliksi on arvioitu 11 vuotta ja peittoprosentiksi uran suhteen enää 12 %. Taulukon 6 KVL 3 000 -rivi on siis PYRO-mallin osaverkkojen AB 3 000 ja AB 6 000 rajalla.

Liikenneviraston raportissa Uusiopäällysteiden käyttö päällysteiden ylläpidossa (Rantanen ja Suikki, 2009) on vertailtu tilastollisesti uusiopäällysteiden (REM) kestoikää

varsinaisen uudelleenpäällistykseen (MP) kestoikään. Urautumisen perusteella laskettu keskimääräinen kestoikä KVL-luokan 3 000–6 000 teille on MP:lle 9 vuotta ja REM:lle 7 vuotta. Näitä lukuja voi verrata taulukon 6 rivin KVL 4 500 lukuihin. KVL-luokalle yli 6 000 vastaavat kestoiät ovat 8 ja 6 vuotta, joita voi verrata taulukon 6 rivien KVL 6 000 ja 9 000 lukuihin.

Tämän työn urauttamismallin kiertoajat ja peittoprosentit vastaavat hyvin edellä mainituissa raporteissa esitettyjä kiertoaikoja ja peittoprosentteja varsinkin LTA/MP:n osalta. Myös KVL:llä 9 000 lasketut tulokset vastasivat PYRO-mallin osaverkolle SMA 12 000 arvioituja kiertoaikoja ja peittoprosentteja, vaikka tätä mallia kehitettäessä on keskitytty AB-päällysteisiin, eli tämän työn tuloksia voi mahdollisesti soveltaa myös SMA-pintaisille teille. Varsinkin suuremmilla KVL:n arvoilla REM:n kiertoajat verrattuna LTA/MP-toimenpiteeseen ovat ehkä hieman liian lyhyitä.

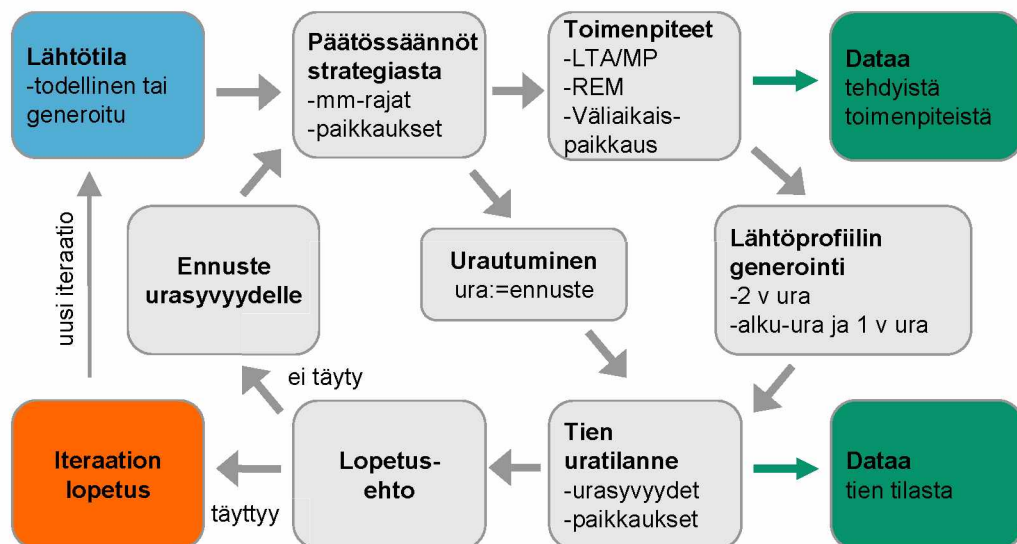
Todellisten uraprofiilien kanssa tehtyjen vertailujen sekä tämän luvun kiertoaika-peittoprosenttitarkastelujen pohjalta voidaan todeta, että urauttamismalli tuottaa syvyydeltään sekä muodoltaan todenmukaisia uraprofiileja. Urauttamismallin ympärille on hyvä lähteä toteuttamaan varsinaista simulointimallia.

4 Simulointimalli

Tässä luvussa kuvataan työssä kehitetyn simulointimallin toiminta. Edellisessä luvussa kehitetty urauttamismalli on implementoitu simulointimalliin. Simulointimalli urauttaa tutkittavaa tieosuutta urauttamismallin mukaisesti ja tekee osuudelle strategian mukaisia toimenpiteitä suoraviivaisten päätössääntöjen perusteella.

4.1 Simulointimallin perusrakenne

Tässä esitellään työssä kehitettävän simulointimallin perusrakenne. Työn simulointimalli perustuu tavalliseen Monte Carlo -simulointiin. Kuvassa 17 on esitetty simulointimallin toimintaperiaate kaaviona. Simulointi alkaa lähtötilasta, joka voi olla todellinen tai se voidaan generoida lähtöprofiilimallilla. Lähtötila on ennuste tien urasyvyydelle.



Kuva 17. Simulointimallin toimintaperiaate. Yksi kierros kaaviossa edustaa yhtä vuotta.

Mallin toiminta jäljittelee todellista päällystysohjelmoinnin vuosikiertoa. Kesällä suoritetaan mittaukset, joiden perusteella ennustetaan urasyvyyttä seuraavan vuoden loppuun. Seuraavan kesän päällystyskohteet ohjelmoidaan näitä ennusteita hyväksi käyttäen.

Seuraavaksi käydään mallin toiminta läpi kuvaan 17 pohjaten vaihe vaiheelta alkaen lähtötilasta.

Lähtötila

Lähtötilana on joko lähtöprofiilimallilla generoitu tai todellinen uraprofiili. Jos käytetään generoitua uraprofiilia, arvotaan se aina uudestaan uuden iteraation alkaessa

Päätössäännöt strategiasta

Lähtötilaan sovelletaan päällystysstrategiaa, joka annetaan urasyvyyteen perustuvina millimetrimääräisinä rajoina. Lisäksi voi olla sääntöjä koskien urapaikattujen kohtien uudelleenpäällystämistä.

Urautuminen

Jos satametriselle ei tehdä sääntöjen perusteella toimenpiteitä, se urautuu ennustettuun urasyvyyteen.

Toimenpiteet

Jos satametriselle tehdään toimenpiteitä, tallennetaan tiedot tehdyistä toimenpiteistä iteraation tulosten laskemista varten. Kun satametriselle tehdään päällystystoimenpiteitä (LTA/MP tai REM), sille generoidaan kahden vuoden ikäisen päällysteen urasyvyys lähtöprofiilimallilla.

Lähtöprofiilin generointi

Lähtöprofiilimalli luo päällystetyn kohteen 2. vuoden urasyvyyden, alku-uran sekä 1. vuoden urasyvyyden. Kahden vuoden ikäisen päällysteen urasyvyyden odotusarvon poikkeama regressiomallin (luku 3.3.6) antamasta urasyvyydestä on sama kuin iteraation lähtöprofiilissa.

Alku-uraksi asetetaan 2 millimetriä ja yhden vuoden ikäisen päällysteen urasyvyydeksi alku-uran ja kahden vuoden uran keskiarvo. Alku-uralla ja vuoden ikäisen päällysteen urasyvyydellä ei ole vaikutusta mallin tekemiin toimenpiteisiin, koska näin uudelle päällysteelle ei tehdä koskaan toimenpiteitä ja urasyvyyden kehittyminen ajan myötä määräytyy mallissa vain kahden vuoden ikäisen päällysteen urasyvyydestä. Alku-ura ja vuoden ikäisen päällysteen urasyvyys vaikuttavat kuitenkin osaltaan tien urasyvyyden keskiarvoon, joten niiden on hyvä olla mukana mallissa. Väliaikaispaikatut satametriset leimataan paikatuiksi ja niitä ei huomioida esimerkiksi urasyvyyden keskiarvoa laskettaessa.

Tien uratilanne

Tien uratilanne sekä tiedot väliaikaispaikatuista osuuksista tallennetaan iteraation tulosten laskemista varten.

Lopetusehto

Lopetusehto määrää, onko aika lopettaa iteraatio, vai jatketaanko seuraavalle vuodelle. Yksinkertaisimmillaan lopetusehto voi olla, että simulointia jatketaan kunnes vaikkapa 25 vuotta on kulunut.

Ennuste urasyvyydelle

Jos iteraatio jatkuu, lasketaan seuraavaksi ennusteet seuraavan vuoden urasyvyydelle urauttamismallin ennustemallilla kaavan (12) mukaisesti. Ennuste lasketaan siis satametrisen urakehityksen ja KVL:n perusteella. Ennusteisiin sovelletaan seuraavaksi taas toimenpidesääntöjä.

Iteraation lopetus

Lopetusehdon täyttyessä iteraatio päättyy siihen. Iteraatioita suoritetaan peräkkäin ennalta määrätty määrä, esimerkiksi 10 000.

Seuraavissa luvuissa käydään tärkeimpiä kohtia tarkemmin läpi seuraavasti. Luvussa 4.2 kerrotaan simulointimallin teknisestä toteutuksesta, luvussa 4.3 esitellään tarkemmin lopetusehtoa ja luvussa 4.4 käydään läpi mallin mahdollistamat toimenpidekierrot. Luvussa 4.5 esitellään mallin parametrit ja luvussa 4.6 kerrotaan, mitä tunnuslukuja malli tuottaa lopputuloksena.

4.2 Simulointimallin tekninen toteutus

Simulointimalli on toteutettu Mosel-ohjelmointikieltä käyttävällä Xpress-IVE-mallinnusohjelmistolla, ja siinä on noin 2 300 riviä ohjelmakoodia. Kun tutkittavan osuuden pituus on 10 kilometriä, simulointiaika 25 vuotta ja iteraatioita 10 000, kuluu simulointiin tavanomaisella, nykyaikaisella tietokoneella noin 4 minuuttia. Simuloinnin kesto aika määrytyy suhteessa tutkittavan osuuden pituuteen, aikaan ja iteraatioiden lukumäärään. Minkä tahansa näistä kaksinkertaistaminen kaksinkertaistaa simulointiin kuluvan ajan, ja puolittaminen puolittaa sen.

Urauttamismallissa käytetään useammassa kohdassa normaalijakautuneita satunnaislukuja, mutta käytettävässä ohjelmistossa ei ollut valmiina kuin tasajakautuneita satunnaislukuja tuottava generaattori. Myöskään valmista approksimaatiota normaalijakauman kertymäfunktion käänteisfunktiolle ei ollut käytettävissä. Normaalijakautuneita satunnaislukuja tuottava funktio piti siis ohjelmoida malliin itse. Funktio perustuu Boxin-Müllerin muunnokseen (Box ja Müller, 1958).

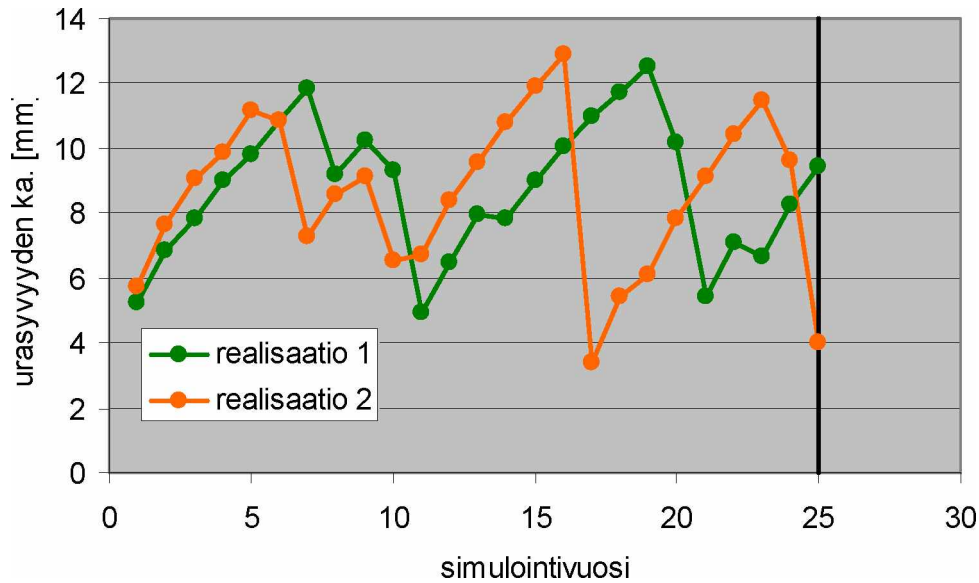
Iteraation aikana siitä tallennetaan dataa satametriseen ja vuoden tarkkuudella. Dataa tallennetaan tehdyistä toimenpiteistä ja tien tilasta, kuten esimerkiksi päällystyskohteista, urasyvyyksistä ja väliaikaista paikkauksista. Iteraation loputtua datasta lasketaan iteraation tulokset, kuten keskimääräinen päällystyskohteen pituus, töiden kustannukset ja saumojen keskimääräinen lukumäärä. Iteraation tulokset tallennetaan tuloksia kerääviin summamuuttujiin ja tarkka satametrise data sekä kyseisen iteraation tulokset hävitetään. Simuloinnin lopuksi summamuuttujista lasketaan simuloinnin varsinaiset tulokset, kuten päällystyskohteen pituuden, kustannusten ja saumojen lukumäärän odotusarvot.

4.3 Lopetusehto

Seuraavaksi esitellään tarkemmin simuloinnissa käytettäviä lopetusehtoja. Yksinkertaisin lopetusehto on ennalta määrätty, kiinteä simulointiaika, mutta siihen liittyy tiettyjä ongelmakohtia. Vaihtoehtoisella lopetusehdolla eli kuntokriteerillä päästään eroon kiinteän simulointiajan aiheuttamista ongelmista ja saadaan vertailukelpoisempaa tietoa vuosikustannuksista.

4.3.1 Kiinteä simulointiaika

Yksinkertaisin lopetusehto on kiinteä simulointiaika, joka tarkoittaa sitä, että iteraatio päättyy, kun määrätty määrä simulointivuotia on ajettu. Kuvassa 18 on esitetty tutkittavan osuuden urasyvyyden keskiarvo simulointivuotien funktiona kahdelle realisaatiolle. Iteraatio päättyy, kun simulointi on edennyt 25 simulointivuotta (pystyvii-va). Iteraatio lähtee aina liikkeelle yhtenäisestä osuudesta, joka on päällystetty kaksi vuotta aiemmin.



Kuva 18. *Urasyvyyden keskiarvo simulointiajan funktiona kahden eri realisaation tapauksissa, kun simulointiajaksi on määrätty 25 vuotta (pystysuora viiva). Osuuden pituus on 10 km, KVL 6 000 ja toimenpiteenä pelkkä LTA/MP.*

Kuvassa 18 keskimääräinen urasyvyys kasvaa, jos osuudelle ei tehdä jonakin vuonna toimenpiteitä, mutta se kasvaa myös, jos osuudelle tehdään toimenpiteitä vain aivan lyhyelle matkalle. Keskimääräisen urasyvyyden pienentyminen tarkoittaa, että osuudelle on varmasti tehty toimenpiteitä.

Kuvan 18 realisaation 1 keskimääräinen urasyvyys on simulointiajan päättyessä 25 vuoden kohdalla 9.4 millimetriä ja realisaation 2 keskimääräinen urasyvyys 4.0 millimetriä. Realisaation 2 tapauksessa tie on päällystetty uudelleen lähes kokonaan vuosien 24 ja 25 aikana, ja päällyste jää erittäin hyvään kuntoon simuloinnin päättyessä. Realisaation 1 kohdalla keskimääräinen urasyvyys jää huomattavasti korkeammaksi, ja uudelleenpäällystystoimenpiteitä olisi varmasti tehty lähivuosien aikana melko paljon, jos simulointi olisi jatkunut. Realisaatioiden erilaisuus heijastuu luonnollisesti vuosikustannuksiin, jotka ovat realisaation 1 tapauksessa 36 000 € ja realisaation 2 tapauksessa 52 000 €. Iteraatioiden vuosikustannuksiin tulee suuri hajonta, jolloin tarvitaan paljon iteraatioita tarkan arvion saamiseksi odotusarvoisille vuosikustannuksille.

Simuloinnin lopputuloksena on kustannusten lisäksi kiinnostavaa tietää, mihin kuntoon tie keskimäärin jää tietyllä strategialla simuloinnin päättyessä. Jos iteraatiot päättyvät siten, että tie ehditään juuri päällystää ennen iteraation loppumista (realisaatio 2) tai vaihtoehtoisesti tie jää odottelemaan uudelleenpäällystystä (realisaatio 1), ei keskimääräinen urasyvyys anna tarkkaa kuvaa tien loppukunnosta. Voi olla, että tie jää yhdessä kolmasosassa realisaatioista erittäin hyvään kuntoon ja kahdessa kolmasosassa erittäin huonoon kuntoon. Tällöin keskiarvoinen loppukunto ei kerro juuri mitään tutkittavalla strategialla saavutettavasta todellisesta loppukunnosta, sillä loppukunto on aina joko erittäin hyvä tai erittäin huono, eikä koskaan keskiarvon mukainen.

Kolmas ongelma liittyy myös strategioiden vertailuun. Jos strategiat eroavat siten, että toisella strategialla tietä pidetään keskimäärin paremmassa kunnossa, eroavat myös keskimääräiset lopputilat keskenään. Tällöin ei tiedetä, mikä osuus kustannussäästöstä johtuu toimenpiteiden lykkäämisestä ja mikä huonommasta loppukunnosta.

Määrätyssä loppuajassa on siis kolme ongelmakohtaa:

- Tarkkojen tunnuslukujen saamiseksi tarvitaan paljon iteraatioita.
- Strategialla saavutettavasta loppukunnosta ei saada tarkkaa kuvaa.
- Strategioiden välinen vertailu on vaikeaa, sillä lopputilat eroavat toisistaan.

Näistä ongelmakohdista päästään eroon vaihtoehtoisella lopetuskriteerillä eli kuntokriteerillä.

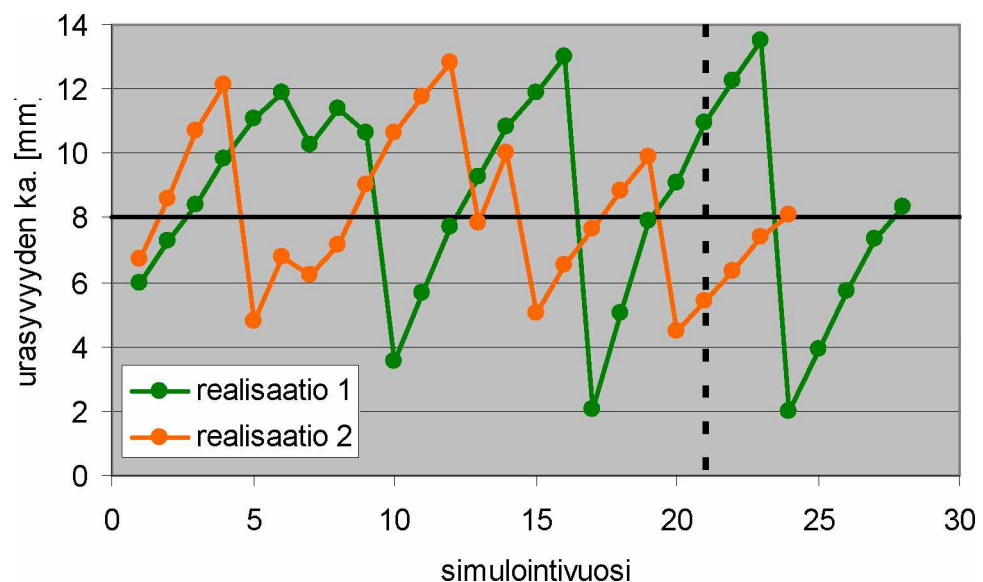
4.3.2 Kuntokriteeri

Kuntokriteerillä päästään eroon määrätyn simulointiajan ongelmakohdista. Se on urauttamismallin ohella toinen tämän työn tuoma yleiskäyttöisempi kontribuutio.

Kuntokriteeriin liittyy kaksi asetusta:

- pienin simulointiaika (vuosia)
- lopetusraja, joka on urasyvyyden keskiarvo, jonka ylittyessä alhaalta päin simulointi päättyy (mm)

Kuvassa 19 on demonstroitu kuntokriteerin toimintaa. Pystysuora katkoviiva kuvaa pienintä simulointiaikaa, joka on tässä 21 vuotta, ja paksu vaakasuora viiva kuvaa lopetusrajaa, joka on tässä 8.0 millimetriä. Iteraatio päättyy kun, lopetusraja ylitetään alhaalta päin, ja se on edennyt vähintään 21 vuotta.



Kuva 19. Urasyvyyden keskiarvo simulointiajan funktiona kahden eri realisaation tapauksissa, kun lopetusehtona on kuntokriteeri. Pienin simulointiaika on 21 vuotta (pystysuora katkoviiva) ja lopetusraja 8.0 mm (paksu vaakasuora viiva). Osuuden pituus on 10 km, KVL 6 000 ja toimenpiteenä on pelkkä LTA/MP.

Jos pysäytysraja olisi tässä kiinteä 25 vuotta, olisivat urasyvyyden keskiarvot olleet lopussa hyvin erilaiset. Realisaatiossa 1 urasyvyyden keskiarvo 25 vuoden kohdalla oli 3.9 mm, ja realisaatiossa 2 se olisi todennäköisesti kasvanut noin 9 millimetriin. Realisaatiot ovat myös muuten erilaisia; realisaatiossa 1 osuus on päällystetty aina kerrallaan lähes kokonaan (vuosina 10, 17 ja 24) ja realisaatiossa 2 on puolestaan tehty lyhyempiä toimenpiteitä.

Nyt realisaatiot päättyvät keskenään hyvin samanlaiseen loppukuntoon, ja realisaatio 1 saa hyödyn vuonna 24 tehdystä toimenpiteestä, jossa koko 10 km päällystettiin kokonaan. Realisaatiossa 1 tehdään 28 vuoden aikana noin 30 km uutta päällystettä ja realisaatiossa 2 noin 25 km 24 vuoden aikana. Vuosikustannukset realisaatiossa 1 ovat 47 400 € ja realisaatiossa 2 käytännössä samat eli 47 300 €. Kiinteällä simulointiajalla ne poikkeaisivat huomattavasti toisistaan.

Kuntokriteerillä saavutetaan seuraavat edut:

- Odotusarvoiset vuosikustannukset saadaan määritettyä tarkemmin, kun vuosikustannusten hajonta pienenee.
- Tiedetään, mihin loppukuntoon strategiat todellisuudessa päätyvät.
- Eri strategioiden kustannuksia voidaan vertailla helposti, kun simulointi voidaan määrätä loppumaan samaan loppukuntoon eri strategioilla.

Tässä loppukunnon kriteerinä käytetään pelkästään urasyvyyden keskiarvoa. Sama keskiarvo voi toki määräytyä eri tavoilla, eli tie voi olla tasaaisessa kunnossa tai siellä voi olla erittäin huonoja ja erittäin hyviä osuuksia. Tässä kuitenkin ajatellaan, että nämä tilanteet ovat tavallaan samanarvoisia. Koska malli toimii vuoden tarkkuudella, kuntokriteeri ei saa iteraatioita pysähtymään tarkalleen samaan keskimääräiseen urasyvyyteen, vaan lopputilan keskimääräisessä urasyvyydessä on pientä vaihtelua. Lisäksi täytyy muistaa, että paikatut osuudet eivät ole mukana keskimääräisessä urasyvyydessä.

Periaatteessa kuntokriteeri voisi olla monimutkaisempikin; siinä voisi olla esimerkiksi vaatimuksia keskimääräisestä urasyvyydestä, huonokuntoisten määrästä ja paikkausten määrästä. Ongelmaksi muodostuisi kuitenkin se, että nämä vaatimukset eivät täytyisi ikinä samaan aikaan tai vaatimusten tähtyminen kestäisi hyvin kauan. Kuntokriteerin on siis oltava mahdollisimman yksinkertainen, ja kuitenkin sen on kuvattava päällysteen kuntoa mahdollisimman hyvin. Keskimääräinen urasyvyys täyttää parhaiten nämä vaatimukset. Esimerkiksi tietyn millimetrirajan ylittävien satametristen osuus olisi huonompi kriteeri, koska siinä kyseisen rajan alittavien satametristen urasyvydet eivät vaikuta mitenkään tunnusluvun arvoon.

Lopetusraja eli keskimääräinen urasyvyys on valittava järkevästi, jotta se ylitetään pian pienimmän simulointiajan ylittyttyä. Lopetusraja ei saa olla liian suuri tai pieni, jolloin sen ylittäminen alhaalta päin voi kestää erittäin kauan. Hyvä vaihtoehto on valita lopetusraja läheltä keskimääräistä urasyvyyttä.

4.3.3 Ylläpitokustannusten määrittäminen

Kun eri strategioita vertaillaan, halutaan usein, että vertailun kohteena on nimenomaan tiettyä aikana strategiaa soveltamalla saatava kustannussäästö eikä strategioiden eroavasta loppukunnosta johtuva kustannusero. Tällöin tarkastelu strategioiden välillä täytyy lopettaa samaan lopputilaan, kuten kuntokriteerissä, tai lopputilan eroavaisuudet on käsiteltävä jollain muulla tavalla.

Kuntokriteeriä voisi soveltaa muissakin rappeutuvaa infrastruktuuria käsittelevissä matemaattisissa malleissa. Vaatimuksena on, että pystytään löytämään tarpeeksi yksinkertainen, mutta kuvaava kuntomittari, kuten tässä päällysteen keskimääräinen urasyvyys.

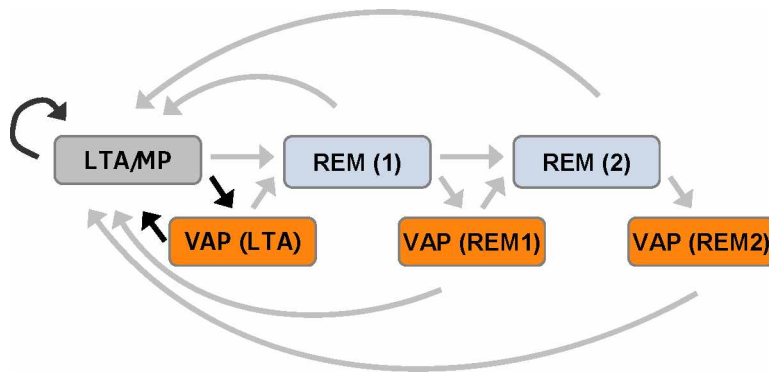
Muita ylläpitokustannuksen määrittämiseksi käytettyjä lopputilan käsittelytapoja ovat:

- **Loppukunnon arvottaminen** eli eri strategioiden välisten lopputilojen kuntoerojen muuttaminen rahaksi. Tällöin haasteena on määrittää rahallinen arvo lopputilan kunnolle.
- **Pitkä simulointiaika**, jolloin simulointia jatketaan niin pitkään (esim. 100 vuotta), että lopputilan kuntoeroista johtuva kustannusero jää hyvin pieneksi simuloinnin aikana saavutetun, eri strategioista johtuvan kustannuseron rinnalla. Tässä haasteena voi olla tutkimustulosten viestintä käyttäjän suuntaan. Sadan vuoden tarkastelu aika kuulostaa etäisen pitkältä, kun tavoitteena on saada säästöjä lyhyellä aikavälillä.
- **Diskonttaaminen**, jolloin simulointiajan täytyy myös olla melko pitkä. Kustannukset diskontataan, jolloin kustannusero määräytyy lähinnä alkuvuosien pohjalta, ja lopputilan kuntoeron vaikutus pienenee.
- **Tarkasteluajan valinta** voidaan usein tehdä deterministisissä laskelmissa siten, että lopputilat ovat samat. Jos toisella strategialla uusimisväli on 9 vuotta ja toisella 6 vuotta, valitaan tarkastelujaksoksi 18 vuotta, jolloin tarkastelu päättyy molemmilla juuri uusittuun kohteeseen. Tämän työn kaltaiseen simulointiin tapa ei sovi, sillä uusimisvälit eivät ole deterministisiä ja kohdetta ei välttämättä uusita kokonaisuudessaan yhdellä kertaa.

Kuntokriteeri voisi olla monissakin simulaatioissa ja laskelmissa käyttökelpoinen vaihtoehto edellä esitetyille tavoille. Tässä työssä se on tarkoituksenmukaisin tapa.

4.4 Toimenpiteet ja toimenpidekierrot

Simulointimallin rakenne mahdollistaa kolme erilaista toimenpidettä eli LTA/MP:n, REM:n ja väliaikaispaikkauksen. Mallirakenne mahdollistaa remix-toimenpiteen tekemisen kahteen kertaan ennen kuin vaaditaan varsinainen uudelleenpäällystystoimenpide (LTA/MP). Tämä vastaa esimerkiksi PYRO-mallin käytäntöä (Mild ym., 2011). Kolmen peräkkäisen uusiotoimenpiteen käyttö ei ole järkevää (Rantanen ja Suikki, 2009), joten kolmatta remix-toimenpidettä ei toteutettu malliin. Mallirakenne mahdollistaa väliaikaispaikkauksen kaikkien päällystystoimenpiteiden välissä. Mallirakenteen mahdollistamat toimenpideketjut on esitetty kuvassa 20. Tässä työssä tutkittavista strategioista kerrotaan luvussa 5.1, ja niiden toimenpidekierrot on esitetty kuvassa mustilla nuolilla.



Kuva 20. Simulointimallin mahdollistamat toimenpidekierrat. Tässä työssä tutkitut toimenpidekierrat on esitetty mustilla nuolilla. VAP tarkoittaa väliaikaispaikkausta, ja esimerkiksi VAP (LTA) tarkoittaa väliaikaispaikattua päällystettä, jonka edellinen päällystystoimenpide oli LTA/MP.

Toimenpidekierrat on mallinnettu siis siten, että tiedetään, missä päällystyskierron vaiheessa mikäkin satametrinen on. Tämä mahdollistaa sen, että toimenpiteen hinta riippuu siitä, missä kohti päällystyskiertoa satametrinen on, eli jokaisella kuvan 20 nuolella voi olla eri hinta.

4.5 Parametrit

Suurin osa mallin parametreista liittyy urauttamismalliin, ja ne on esitelty jo aiemmin urauttamismallin yhteydessä. Seuraavaksi käydään läpi loput parametreihin liittyvät asiat, eli kerrotaan tarkemmin simuloinnin lähtötilavaihtoehdoista ja esitellään toimenpidehintojen määräytyminen. Lopuksi luvussa luetellaan kaikki mallin muuteltavat parametrit, liittyivätkö ne urauttamismalliin tai eivät.

4.5.1 Lähtötila

Simuloinnin lähtötilana voidaan käyttää joko todellisen tien kuntotilaa tai generoitua kuntotilaa. Tässä kerrotaan niihin liittyvistä yksityiskohdista.

Todellinen tieosuus

Todellista lähtötilaa käytettäessä malli käyttää aineistona Liikenneviraston satametridataa. Aineisto sisältää tietoja muun muassa satametrille tehdyistä toimenpiteistä sekä PTM-autolla (palvelutasomittaus) mitattua kuntoaineistoa. Aineisto on muokattu SAS-ohjelmistolla mallille sopivaan muotoon.

Käyttäjä antaa tutkittavan tien numeron, osuuden alun tieosan (*aosa*) ja osuuden alun etäisyyden tieosan alusta (*aet*) sekä osuuden pituuden. Malli lukee muut tarvittavat tiedot alkujakaumasta kullekin satametrille. Näitä tietoja ovat KVL, edellinen toimenpide, toimenpidekierron vaihe (LTA/MP, REM(1) tai REM(2)) sekä päällystysvuosi ja ennustettu urasyvyys. Ennustetuksi urasyvyudeksi luetaan lähtötietoaineiston muuttuja *ura_nykytila*, joka on siis PMSPro:n ennuste vuoden lopun urasyvyudeksi. Jos malli ei tee ensimmäisenä vuonna toimenpidettä, tämä ennuste toteutuu.

Koska tiedot luetaan erikseen kullekin satametrisele, voidaan tutkia hyvinkin vaihtelevassa kunnossa olevia osuuksia. Tiellä voi olla eri vuosina päällystettyjä osuuksia ja KVL voi vaihdella osuuden sisällä. Oletus on, että lähtötilassa ei ole väliaikaispaikkoja.

Kun osuus päällystetään uudelleen, sen uraprofiili generoidaan lähtöprofiilimallilla käyttäen kullekin satametrisele sen oikeaa keskimääräistä vuorokausiliikennettä. Käyttäjän on asetettava lähtöprofiilimallin parametrit ϕ ja σ . Mitä pidempi simulointiaika on, sitä vähemmän alkutila vaikuttaa tuloksiin. Tämä johtuu siitä, että alkutila vaikuttaa tien urautumiseen vain ennen ensimmäistä päällystystoimenpidettä.

Generoitu lähtötila

Jos simuloinnin lähtötilana ei käytetä mitään todellista tietä, arvotaan lähtötilan uraprofiili lähtöprofiilimallilla. Tutkittavalle osuudelle annetaan tätä varten KVL, joka on sama koko osuudelle sekä lähtöprofiilimallin parametrit ϕ ja σ . Lisäksi annetaan toimenpidekierron vaihe ja osuuden pituus. Simulointi alkaa aina tilanteesta, jossa koko osuus on päällystetty (LTA/MP tai REM) kaksi vuotta aiemmin. Lähtöprofiili arvotaan jokaiselle iteraatiolle uudelleen. Lähtöprofiilia varten arvotaan profiilin odotusarvon poikkeama regressiomallin antamasta odotusarvosta (luku 3.3.6), ja sitten tämän poikkeutetun odotusarvon ympärille arvotaan lähtöprofiili AR-mallilla.

4.5.2 Toimenpidehinnat

Strategioiden väliset kustannussäästöt johtuvat kahdesta tekijästä. Ensimmäinen on päällystystoimenpiteen lykkääminen, jolloin kiertoajat kasvavat ja vuosikustannus pienenee. Toinen kustannussäästöjä aikaansaava tekijä on päällystyskohteiden keskipituuden kasvattaminen, sillä kohteiden pidentyessä yksikköhinta laskee. Jotta toisesta tekijästä eli keskipituuden kasvattamisesta saatavat säästöt tulisi arvioitua mahdollisimman tarkasti, täytyy päällystyskeskipituuden yksikköhinta kohdepituuden funktiona mallintaa mahdollisimman todenmukaisesti.

Toimenpidekustannukset määritettiin erikseen varsinaiselle uudelleenpäällystykselle (LTA/MP), remix-toimenpiteelle (REM) sekä väliaikaispaikkaukselle. LTA/MP:n ja REM:n kilometrihinta riippuu kohteen pituudesta. Pidemmällä kohteella saavutetaan matalampi kilometrihintajointuen kiinteistä kustannuksista. Kiinteitä kustannuksia aiheuttaa muun muassa päällystyslaitteiston siirto työmaalle. Erittäin lyhyet kohteet aiheuttavat lisäksi vajaakäyttöä, sillä kohteen päällystäminen kestää vähemmän kuin yhden työpäivän, mutta uutta kohdetta ei päästä aloittamaan saman päivän aikana kohteiden välimatkasta johtuen.

Tiehallinnon raportissa Tienpäällystysurakoiden optimaalinen sisältö ja laajuus (Mild ja Spoof, 2009) on tutkittu muun muassa päällystyskohteiden lyhentymisen kustannusvaikutuksia. Kyseisen hankkeen puitteissa laadittiin päällystysurakoitsijoille kysely, jolla kartoitettiin päällystyskohteiden lyhentymisen kustannusvaikutuksia. Kyselyssä kysyttiin vaikutusta hintaan, jos kymmenen kilometrin päällystyspituus koostuu yhden kohteen sijasta kahdesta 5 kilometrin tai viidestä 2 kilometrin tai kymmenestä 1 kilometrin kohteesta. Hinta-arviot pyydettiin AB 16/100 MP -menetelmälle ja SMA 11/20 REM -menetelmälle. 16 ja 11 viittaavat maksimiraekokoon millimetreinä ja 100 ja 20 uuden asfaltin määrään kilogrammoina neliometriä kohti. Tulokset ilmoitettiin kilometrihinnan suhteellisenä nousuna verrattuna 10 kilometrin yhtenäiseen kohteeseen.

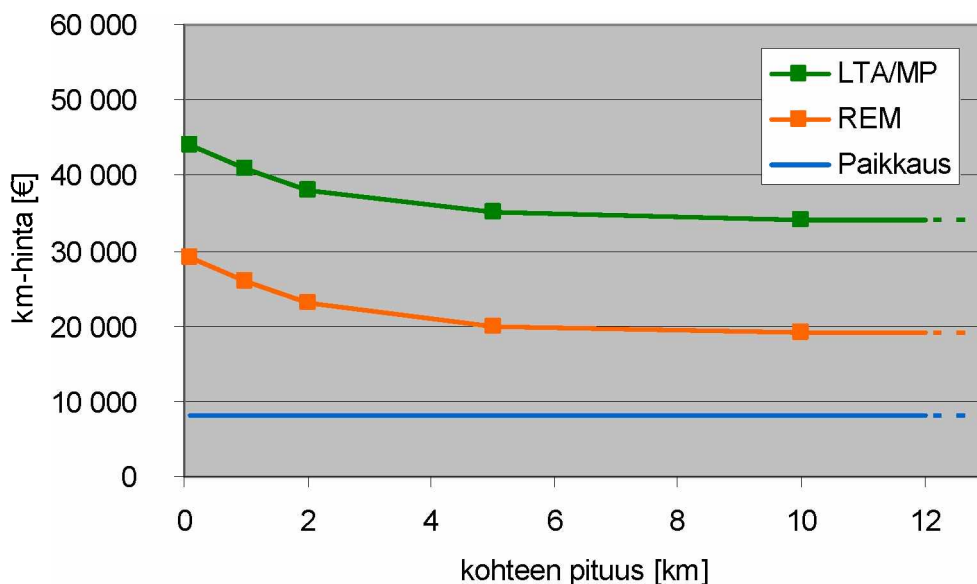
Tässä työssä käytetyt euromääräiset kilometrihinnat on arvioitu asiantuntija-arviona¹ 5 kilometrin kohteelle, ja ne ovat 35 000 €/km LTA/MP:lle ja 20 000 €/km REM:lle. Yhden, kahden ja kymmenen kilometrin kohteiden kilometrihinnat laskettiin käyttäen raportin (Mild ja Spoof, 2009) kyselyn tuloksia. Tuloksista käytettiin toimenpiteen AB 16/100 MP prosentteja LTA/MP-toimenpiteelle ja toimenpiteen SMA 11/20 REM prosentteja REM-toimenpiteelle.

Hinnat on esitetty taulukossa 7. Toimenpiteiden hinnat nousevat kummallakin menetelmällä euromääräisesti samaa vauhtia kohdepituuden lyhentyessä, mutta toisaalta REM-toimenpiteen hinnat nousevat suhteessa voimakkaammin.

Taulukko 7. Päällystystyön kilometrihinnat eripituisille kohteille.

	1 km	2 km	5 km	10 km
LTA/MP	41 000 €/km	38 000 €/km	35 000 €/km	34 000 €/km
REM	26 000 €/km	23 000 €/km	20 000 €/km	19 000 €/km

Väliaikaispaikkauksen hintana käytetään 4 €/m². Urapaikan leveys on 1 m, eli jos kaikki neljä uraa paikattaisiin koko matkalta, tulisi paikkausta satametriseksi 400 neliömetriä. Tässä työssä käytetään arviota, että paikattavalle satametriseksi tulee keskimäärin 200 neliömetriä paikkaa. Kilometrihinnaksi tulee tällöin 8 000 €. Paikkauksiin käytettävä laitteisto on kevyttä, ja tyypillisesti paikattavia satametrisiä on siellä täällä. Tämän työn terminologiaa käyttäen yksittäiset paikkauskohteet ovat vain sadan tai korkeintaan muutaman sadan metrin mittaisia, mutta niitä tehdään useita samalla kertaa. Siispä väliaikaispaikkauksen hinta ei tässä mallissa riipu kohteen pituudesta, vaan on 8 000 €/km kohteen pituudesta riippumatta. Kuvassa 21 on esitetty toimenpiteiden kilometrihinnat kohdepituuden funktiona.



Kuva 21. Toimenpiteiden kilometrihinnat kohdepituuden funktiona.

¹ Harri Spoof, Pöyry CM Oy, haastattelu Vantaalla 13.4.2011

Hinta määräytyy lineaarisesti kahden pisteen välillä. Välillä 0.1–1 km kilometrihinnan oletetaan laskevan saman verran kuin välillä 1–2 km. Kohdepituuden kasvaessa yli 10 kilometrin oletetaan, että kilometrihintaa ei enää laske.

Lisäksi mallissa on hinnoille kertoimet, joilla hintoja voidaan helposti skaalata ylös- tai alaspäin. Kertoimet on toteutettu erikseen kaikille kolmelle toimenpidetyypille, ja niiden oletusasetus on luonnollisesti 1, jolloin hinnat ovat taulukon 7 ja kuvan 21 mukaiset.

4.5.3 Muuteltavat parametrit

Tässä luetellaan simulointimallin muuteltavat parametrit ja parametrien mahdolliset oletusasetukset. Luettelossa on myös mainittu, missä luvussa parametri on esitelty.

- **Tutkittava osuus** voi olla todelliselta tieltä tai se voidaan generoida mallilla. (luku 4.5.1)
- **Iteraatioiden lukumäärä** (luku 4.1)
- **Lopetusehtona** voi olla:
 - kiinteä simulointiaika, joka annetaan vuosina (luku 4.3.1)
 - kuntokriteeri (luku 0), jolloin annetaan pienin simulointiaika (vuosia) ja lopetusraja (mm).
- **Urasyvyyden odotusarvo** kahden vuoden kuluttua päällystyksestä voidaan laskea regressiomallista (luku 3.3.6) tai käyttäjä voi asettaa sen millimetreinä. Työssä käytetään regressiomallia.
- **AR-mallin parametrit ϕ ja σ** (luvut 3.3.2, 3.3.5). Tässä työssä on yleensä joko $\phi = 0.8$ ja $\sigma = 0.9$ mm tai $\phi = 0.7$ ja $\sigma = 0.6$ mm.
- **Lähtöprofiilimallin minimiurasyvyysskorjaus** (luku 3.3.4). Tässä työssä on yleensä $\mu = 3.5$ mm ja $\sigma = 0.2$ mm.
- **Kohina päällä/pois määrää** sen, onko ennustemallissa ja 2 vuoden ikäisen päällysteen urasyvyyden odotusarvossa kohinaa (luvut 3.2 ja 3.3.6). Oletuksena kohina on päällä.
- **Ennustemallin kohinan jakauma**, eli ε :n odotusarvo μ ja keskihajonta σ . Oletuksena $\mu = 1$ ja $\sigma = 0.2$. (luku 3.2)
- **2 vuoden ikäisen päällysteen urasyvyyden regressiomallin kohinan jakauma**, eli odotusarvo μ ja keskihajonta σ . Oletuksena $\mu = 1$ ja $\sigma = 0.2$. (luku 3.3.6)
- **Hintakertoimet** (luku 4.5.2)
- **Käytettävä strategia** ja
 - strategian millimetrirajat (luvut 5.1.1 ja 5.1.2)
 - urapaikan kestoikä (luku 5.1.2)
- **Huonokuntoisuuden raja** millimetreinä, joka on tässä työssä 15 mm. (luku 3.5.2)

4.6 Mallilla tuotettavat tulokset

Perustuloksiksi kutsutaan simulointimallin tuottamia, noin kahtakymmentäviittä tunnuslukua, joita tarkastellaan vertailtaessa erilaisia päällystysstrategioita. Näihin perustunnuslukuihin on koottu strategian vaikutukset tienkäyttäjälle ja tienpitäjälle. Luvut ovat realisaatioista laskettuja keskiarvoja, eli ne ovat siis estimaatteja odotusarvolle.

Lisäksi jokaisesta simulaatiosta saadaan myös yksityiskohtaisempaa dataa. Mallilla on mahdollisuus ajaa myös yksittäisiä iteraatioita ja tarkastella niitä vieläkin yksityiskohtaisemmin. Perustulokset ja yksityiskohtaiset tulokset ovat siis keskiarvoja iteraatioiden yli, ja ne tarkentuvat kohti odotusarvoaan iteraatioiden lukumäärän kasvaessa.

4.6.1 Perustulokset

Mallilla tuotettavat perustulokset:

- **Keskimääräiset vuosikustannukset**
- **Keskimääräinen päällystyskohteen pituus**
- **Keskimääräinen peittoprosentti**
- **Keskimääräinen urasyvyys** on urasyvyyden keskiarvo vuosien ja satametrysten yli. Väliaikaispaikatut eivät ole tässä mukana.
- **Huonokuntoisten satametrysten osuus keskimäärin ja huippuvuonna.** Väliaikaispaikatut eivät ole tässä mukana.
- **Väliaikaispaikattujen satametrysten osuus keskimäärin ja huippuvuonna.**
- **Saumojen lukumäärä keskimäärin ja huippuvuonna.** Saumalla tarkoitetaan eri päällystyskerroilla tai -menetelmällä tehtyjen päällysteiden välistä poikkisaumaa. Väliaikaispaikkausta ei lasketa tähän.
- **Lopputila** kertoo siitä mihin tilaan tutkittava osuus jää viimeisenä vuonna. Tästä raportoidaan urasyvyyden keskiarvo, yli 11 mm urien osuus (rajaa voi tarvittaessa vaihtaa) ja väliaikaispaikattujen satametrysten osuus.
- **Kiertoajasta** raportoidaan minimi, keskiarvo ja maksimi.
- **Väliaikaispaikattujen kohteiden urasyvyyden keskiarvo**
- **Päällystyskohteiden urasyvyyden keskiarvo.** Väliaikaispaikatut eivät ole tässä mukana.
- **Simulointivuosien lukumäärän keskiarvo** on kiinnostava vain käytettäessä pysäytysehtona kuntokriteeriä. Se kertoo, kauanko kuntokriteerin saavuttaminen keskiarvoisesti kesti. Tähän lukuun voi suhteuttaa toimenpidevuosien lukumäärää ja päällystyspituutta.
- **Paikkausvuodet** eli kuinka monena vuonna keskimäärin käydään tekemässä väliaikaispaikkaa.
- **Päällystysvuodet** eli kuinka monena vuonna keskimäärin käydään tekemässä varsinaista uutta päällystystä.
- **Toimenpidevuodet** eli kuinka monena vuonna keskimäärin käydään tekemässä väliaikaispaikkaa tai päällystystä.
- **Paikkauspituus** eli montako kilometriä keskimäärin väliaikaispaikataan simulointiaikana.
- **Päällystyspituus** eli montako kilometriä keskimäärin päällystetään simulointiaikana. Tätä voi vertailla tutkittavan kohteen pituuden kanssa, eli päätellä moneenko kertaan kohde keskimäärin päällystettiin uudelleen.
- **Paikkauskohteiden lukumäärä**
- **Päällystyskohteiden lukumäärä**

4.6.2 Yksityiskohtaiset tulokset ja yksittäisen iteraation tarkastelu

Perustulosten lisäksi malli tuottaa paljon yksityiskohtaisempiakin tuloksia jokaisesta simulaatiosta. Muun muassa saumojen lukumäärän, keskimääräisen urasyvyyden, väliaikaispaikattujen osuuden, yli 11 mm urasyvyyden osuuden ja huonokuntoisten osuuden keskiarvot esitetään vuosittain. Keskimääräiset toimenpidepituudet eritellään vuosittain ja menetelmän mukaan, samoin kustannukset.

Mallilla on mahdollista tuottaa yksittäisen iteraation tulokset satametrinen ja vuoden tarkkuudella. Tällöin nähdään, missä kunnossa mikäkin satametrinen on ollut minäkin vuonna. Samoin nähdään milloin millekin satametrisele on tehty toimenpiteitä, ja mitä ne ovat olleet. Näitä tuloksia käytetään lähinnä mallin validoinnissa, eli tätä satametrinen ja vuoden tarkkuudella esitettävää dataa tarkastelemalla voi todeta, että malli määrittää esimerkiksi saumojen paikat ja lukumäärät oikein.

5 Ylläpitostrategioiden simulointi

5.1 Strategiat

Strategiat täytyy esittää suoraviivaisina päätössääntöinä, jotta ne voidaan ohjelmoida simulointimalliin. Tässä esitetään millaisia strategiat ovat, ja millaisiksi säännöiksi ne on muutettu.

Strategiat toimivat siten, että LTA/MP-päällystyskohteet määräytyvät urasyvyydelle asetettujen millimetrirajojen perusteella. Lisäksi VAP-LTA/MP -strategiassa käytetään väliaikaispaikkausta. Simulointeja tehdään eri millimetrirajoilla, jolloin saadaan tietoa rajojen vaikutuksista kustannuksiin ja tien kuntoon. Lisäksi strategioita vertaillaan keskenään.

5.1.1 Pelkkä uudelleenpäällystystoimenpide

Pelkkää uudelleenpäällystystoimenpidettä käyttävää strategiaa kutsutaan LTA/MP-strategiaksi. Tässä kerrotaan, millaisilla päätössäännöillä strategia on toteutettu simulointimalliin. Säännöt perustuvat urasyvyydelle asetettuihin rajoihin, joiden perusteella päällystyskohteet määräytyvät.

Strategian säännöt ovat yksinkertaistettu versio HTU pääteiden palvelusopimuksen 2007–2018 säännöistä (Spoof ja Männistö, 2008).

LTA/MP-strategian säännöt:

- Jos satametrisen uran ennuste \geq *toimenpideraja*, päällystetään se sekä kaikki viereiset satametriset, joille:
 - uran ennuste \geq *homogeenisuusraja*.

Säännöissä on siis kaksi rajaa, joista toimenpideraja on korkeampi ja homogeenisuusraja matalampi. Toimenpiderajaan liittyvä sääntö varmistaa, että tielle ei jää toimenpiderajan ylittäviä satametrisiä. Homogeenisuusrajaan liittyvä sääntö tekee kohteista järkevän pituisia ja estää liikenneturvallisuutta ja ajomukavuutta heikentävää vaihtelua urasyvyydessä.

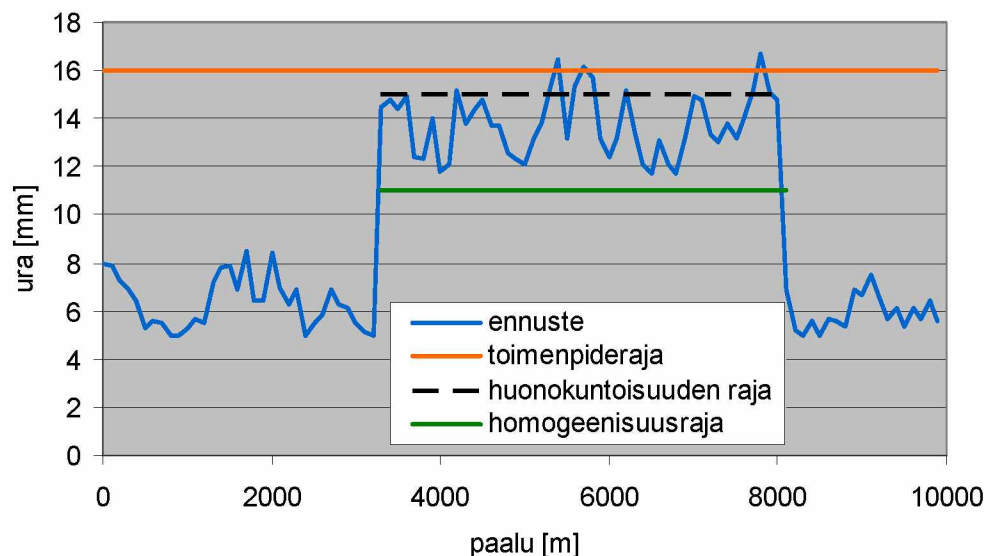
Kuvassa 22 on demonstroitu LTA/MP-strategian sääntöjen toimintaa, kun toimenpideraja on 16 mm ja homogeenisuusraja 11 mm. Kuvassa on kymmenen satametristä, jotka on merkitty niiden alkupään paaluluvun mukaan. Jakso paaluluvulla 400 m ylittää toimenpiderajan, joten se täytyy päällystää uudelleen. Viereisistä satametrisistä homogeenisuusraja ylittyy satametrisillä, joiden alkupään paalulukku on 200–300 m ja 500–700 m. Myös kuvan ensimmäinen satametrinen ylittää homogeenisuusrajan, mutta koska sen ja kohteen välissä on homogeenisuusrajan alittava satametrinen, ei alkupää tule mukaan kohteeseen. LTA/MP-toimenpide tehdään siis kuudelle väritetylle satametriselle.

	0 m	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m	600 m	700 m	800 m	900 m
vuosi t	12.4	10.2	13.4	15.8	16.4	14.2	15.5	13.7	9.9	8.8

Kuva 22. LTA/MP-strategian sääntöjen toiminta, kun toimenpideraja on 16 mm ja homogeenisuusraja 11 mm. Luvut laatikoissa ovat satametrisen ennustettuja urasyvyyksiä. Tummemmalla väritetty satametrisen laukaisee toimenpiteen (LTA/MP), ja mukaan toimenpiteeseen tulevat kaikki väritetyt satametriset.

Kuvan 22 päällystyskohteesta kolmen satametrisen urasyvyys ylitti huonokuntoisuuden rajan 15 mm, eli peittoprosentti olisi $300 \text{ m} / 600 \text{ m} = 50.0 \%$.

Kuvassa 23 on esitetty sääntöjen toimintaa uraprofiilin avulla. Toimenpideraja on edelleen 16 mm ja homogeenisuusraja 11 mm. Kuvassa on 10 kilometrin pituinen osuus.



Kuva 23. LTA/MP-strategian sääntöjen toiminta ja peittoprosentti uraprofiilikuvassa, kun toimenpideraja on 16 mm ja homogeenisuusraja 11 mm. Huonokuntoisuuden raja on 15 mm.

Kuvassa 23 kolme satametristä ylittää toimenpiderajan, mikä laukaisee toimenpiteen. Kohteeksi valikoituu homogeenisuusrajan perusteella 4.8 km pitkä osuus. Urasyvyydestäkin voi päätellä, että päällystämättä jäävä osuus on päällystetty vain muutama vuosi aiemmin.

Kuvassa 23 on demonstroitu myös peittoprosentin määräytyminen. Huonokuntoisuuden raja on 15 mm, ja se on merkitty katkoviivalla. Päällystyskohteesta 15 mm urasyvyyden ylittää 10 satametristä, joten peittoprosentiksi määräytyy $1.0 \text{ km} / 4.8 \text{ km} = 20.8 \%$. Huomaa, että huonokuntoisuusraja tai peittoprosentit eivät mitenkään vaikuta kohteiden määräytymiseen, koska huonokuntoisuusraja ei esiinny strategioiden toimenpidesäännöissä.

Simuloimalla tutkitaan, miten LTA/MP-strategian toimenpiderajan ja homogeenisuusrajan muuttaminen vaikuttaa tienpitoon ja päällysteen kuntoon. Lisäksi LTA/MP-

strategiaa käytetään vertailukohtana väliaikaispaikkausta käyttävälle VAP-LTA/MP-strategialle, joka esitellään seuraavaksi.

5.1.2 Väliaikaispaikkaus

Väliaikaispaikkausta käyttävä VAP-LTA/MP-strategia on jalostettu LTA/MP-strategiasta. Siinä nopeimmin urautuvat kohdat paikataan odottamaan uudelleenpäälystystä, jolloin uudelleenpäälystystä saadaan lykättyä ja ylläpitokustannukset pienenevät. Lisäksi viereiset satametriset ehtivät urautua lisää, ja kohteeseen tulee mahdollisesti mukaan lisää satametrisiä. Tällöin keskimääräinen kohdepituus kasvaa, mikä tuo myös säästöjä.

Säännöt koostuvat kahdesta kohdasta, jotka toimivat siten, että ensin päätetään LTA/MP-kohteet säännön 1 perusteella, ja sitten kohteiden ulkopuolelle jääviin satametrisiin sovelletaan sääntöä numero 2.

VAP-LTA/MP-strategian säännöt:

- 1) Kun satametrisen väliaikaispaikka on yhtä vanha kuin sen *kestoikä*, päälystetään (LTA/MP) se sekä kaikki viereiset satametriset:
 - o jotka on urapaikattu tai
 - o joille uran ennuste \geq *homogeenisuusraja*
- 2) Väliaikaispaikataan kaikki jäljelle jääneet satametriset,
 - o joille uran ennuste \geq *toimenpideraja*.

Säännöissä on siis edelleen kaksi millimetrirajaa, eli toimenpideraja ja homogeenisuusraja. Lisäksi väliaikaispaikalle määritetään kestoikä, eli kauanko paikka voi olla paikallaan ennen uudelleenpäälystystä. Sääntö 1 kerää kuluneiden väliaikaispaikkausten ympärille järkeviä päälystyskohteita. Sääntö 2 varmistaa, että tielle ei jää toimenpiderajan ylittäviä satametrisiä.

Kuvassa 24 on demonstroitu VAP-LTA/MP-strategian sääntöjen toimintaa, kun toimenpideraja on 16 mm, homogeenisuusraja 11 mm ja väliaikaispaikan kestoikä 2 vuotta. Kuvan 24 vuoden t uratilanne on sama kuin LTA/MP-strategiaa esittelevässä kuvassa 22, jotta strategioiden eroja voidaan tarkastella esimerkissä.

	0 m	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m	600 m	700 m	800 m	900 m
vuosi t	12.4	10.2	13.4	15.8	16.4	14.2	15.5	13.7	9.9	8.8
vuosi $t+1$	13.1	10.8	14.2	16.7	VAP 1	15.0	16.4	14.5	10.5	9.3
vuosi $t+2$	14.0	11.5	15.1	VAP 1	VAP 2	16.0	VAP 1	15.4	11.2	9.9

Kuva 24. VAP-LTA/MP-strategian sääntöjen toiminta, kun toimenpideraja on 16 mm, homogeenisuusraja 11 mm ja urapaikan kestoikä 2 vuotta. Vuosina t ja $t+1$ väliaikaispaikataan raidoitettut satametriset. Vuonna $t+2$ tummemmalla väritetty satametrinen laukaisee päälystystoimenpiteen (LTA/MP), ja mukaan toimenpiteeseen tulevat kaikki väritetyt satametriset.

Kuvassa 24 vuonna t yhden satametrisen urasyvyyden ennuste ylittää toimenpiderajan 16 mm, ja se väliaikaispaikataan odottamaan uudelleenpäälystystä (sääntöjen

kohta 2). Seuraavana vuonna $t+1$ kaksi satametristä ylittää toimenpiderajan, ja nekin väliaikaispaikataan odottamaan uudelleenpäällystystä. Merkintä VAP 1 tarkoittaa, että kyseinen satametrinen on ollut paikattuna yhden vuoden. Kolmantena vuonna $t+2$ yksi satametrinen on ollut paikattuna kaksi vuotta (merkintä VAP 2), mikä laukaisee päällystystoimenpiteen (sääntöjen kohta 1). Toimenpiteeseen tulee mukaan 900 metriä väliaikaispaikattua tai homogeenisuusrajan ylittävää päällystettä.

Kuvan 24 esimerkin lopputuloksena on, että päällystystoimenpidettä lykättiin väliaikaispaikkauksilla 2 vuotta, ja siihen tuli mukaan kolme satametristä enemmän kuin kuvassa 22 LTA/MP-strategialla. Kymmenestä satametrisestä yksi oli paikattuna kaksi vuotta ja kaksi satametristä yhden vuoden. Päällystyspituudesta väliaikaispaikattuja tai huonokuntoisuuden rajan (15 mm) ylittäviä on kuusi satametristä yhdeksästä, eli peittoprosentti on $600 \text{ m} / 900 \text{ m} = 66.7 \%$, kun LTA-MP strategialla se oli 50.0% (kuva 22).

Esimerkistä ilmenevät väliaikaispaikkauksen tärkeimmät tavoitteet:

- vuosikustannusten pieneneminen uudelleenpäällystysvälin pidentyessä
- vuosikustannusten pieneneminen keskimääräisen kohdepituuden kasvaessa
- peittoprosentin nostaminen.

Varjopuolena on paikoista sekä paikkaamattomien satametrinen urasyvyyden kasvusta tienkäyttäjälle aiheuttava haitta. Haittaa aiheutuu itse paikkaustoimenpiteestä, sillä kaista joudutaan sulkemaan hetkeksi. Lisäksi paikattu päällyste ei vastaa ajomukavuudeltaan yhtenäistä päällystettä.

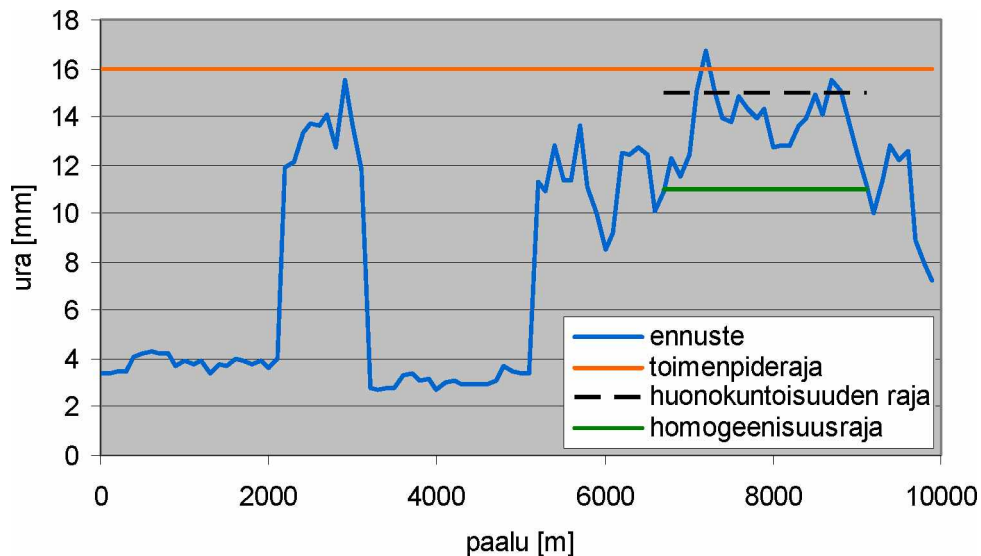
VAP-LTA/MP strategialla kokeillaan erilaisia toimenpiderajoja sekä urapaikan kes-toikiä ja simuloinnin tuloksia vertaillaan LTA/MP-strategiaan.

5.1.3 Näkökohtia strategioista

Työssä tutkittavat strategiat ovat sellaisia, että kohteita ei ole määrätty ennalta, vaan urasyvyyden rajojen perusteella määräytyy, mitkä satametriset tulevat mukaan kohteeseen. Työn edetessä selvisi, että tällaiseen strategiaan olisi erittäin vaikeaa ohjelmoida järkevästi mukaan REM-toimenpidettä seuraavien syiden vuoksi: Sääntöjen pitäisi huomioida edellinen toimenpide ja päätellä sen perusteella, mitä toimenpiteitä tehdään. REM-toimenpiteen voi tehdä korkeintaan kaksi kertaa peräkkäin, ja toisaalta nämä kaksi mahdollisuutta pitäisi käyttää mahdollisimman usein. Jos päällystettävästä osuudesta osaan voisi vielä tehdä REM-toimenpiteen, mutta osaan ei, täytyisi päätellä tehdäänkö koko osuus LTA/MP:lla vai tehdäänkö osaan REM ja osaan LTA/MP vai voiko mahdollisesti REM-kelpoisen tai ei-REM-kelpoisen osuuden jättää vielä odottamaan. Lisäksi asiaan pitäisi vaikuttaa se, onko REM-kelpoisella osuudella alla yksi vai ei vielä yhtään REM-toimenpidettä. Jos alla olisi jo yksi REM, liitettäisiin osuus herkemmin mukaan LTA/MP-kohteeseen, koska osa REM-potentiaalista olisi jo käytetty. Kaiken kaikkiaan REM-toimenpiteen mukaan ottaminen olisi siis melko monimutkaista.

Toisaalta työssä ei ollutkaan tarkoitus tutkia REM-toimenpiteen hyödyllisyyttä, vaan väliaikaispaikkausta ja toimenpiderajoja. Siispä päädyttiin siihen, että tutkittavissa strategioissa on vain yksi päällystystoimenpide eli LTA/MP. Strategioilla saatavia vuosikustannuksia tarkasteltaessa voi sitten huomioida, että REM toisi niihin säästöjä.

Työn strategiat ovat toimenpide-, ja homogeenisuusrajojen suhteen ehdottomia. Asiaa on demonstroitu kuvassa 25, jossa käytetään LTA/MP-strategiaa. Toimenpideraja on 16 mm ja homogeenisuusraja 11 mm.



Kuva 25. Toinen esimerkki LTA/MP-strategian sääntöjen toiminnasta uraprofiilikuvassa, kun toimenpideraja on 16 mm ja homogeenisuusraja 11 mm. Huonokuntoisuuden raja on 15 mm.

Kuvassa 25 muodostuu LTA/MP-strategian sääntöjen perusteella 2.4 kilometrin mittainen päällystyskohde. Homogeenisuusraja katkaisee kohteen alkupäästään kahden rajan alittavan satametrisen ja loppupäässään yhden rajan alittavan satametrisen vuoksi. Päällystysohjelmointia tekevä ihminen ei ehkä katkaisisi kohdetta siihen, vaan ohjelmoisi pidemmän kohteen.

Työn edetessä pohdittiin, pitäisikö olla jokin sääntö, joka estäisi kohteen katkaisun tällaisessa tilanteessa. Tällöin pitäisi määrittää, montako homogeenisuusrajan alittavaa satametristä väliin saa jäädä. Esimerkiksi kuvassa 25 kohteen alkupää katkeaa kahden homogeenisuusrajan alittavan satametrisen takia. Niitä ennen (luettaessa kuvaa kasvavan paaluluvun suunnassa) on neljä homogeenisuusrajan ylittävää satametristä, jotka taas erottaa seuraavista rajan ylittävistä satametrisistä kolme rajan alittavaa satametristä. Lisäksi pitäisi ehkä huomioida mitä satametristen toisella puolella on. Voidaanko päällystämättä jäävät satametriset kenties yhdistää järkevämmiin seuraavana vuonna siellä tehtävään kohteeseen? Vai koskisiko yhdistelysääntö vain samana vuonna tehtävien kohteiden väliin jääviä homogeenisuusrajan alittavia satametrisiä? Tällainen yhdistelysääntö olisi lopulta melko monimutkainen, ja siinä olisi paljon päätettäviä parametreja, joten se jätettiin toteuttamatta.

Työn tulokset on tarkoitettu Liikenneviraston toimintalinjatyön tueksi, jolloin on hyvä että simuloinnissa käytettävät toimenpidesäännöt ovat suoraviivaisia. Työssä halutaan saada tietoa nimenomaan väliaikaispaikkauksen käytön sekä toimenpiderajan nostamisen vaikutuksista. Pitämällä toimenpidesäännöt yksinkertaisina saadaan näiden kiinnostavien parametrien muuttamisen vaikutukset parhaiten esille. Monimutkaisemmat säännöt johtaisivat väistämättä parametrien lukumäärän kasvamiseen, jolloin tärkeimpien parametrien vaikutukset tuloksiin eivät tulisi välttämättä yhtä selvästi esille.

5.2 Simulointitulokset generoidulla lähtötilalla

Seuraavaksi esitellään simulointituloksia LTA/MP- ja VAP-LTA/MP-strategioilla. Työn mallia rakennettaessa on käytetty aineistona KVL:n 3 000–9 000 teitä. Tähän tuloslukuun KVL valittiin skaalan puolivälistä, eli KVL on 6 000, tutkittavan osuuden pituudeksi valittiin 10 kilometriä ja edellisiksi toimenpiteeksi asetettiin LTA/MP. Parametreina käytetään molempia aiemmin esillä olleita parametripareja: homogeenisemmän urautumisen aiheuttavaa parametriparia $\phi = 0.7$ ja $\sigma = 0.6$ mm sekä epähomogeenisemmän urautumisen aiheuttavaa parametriparia $\phi = 0.8$ ja $\sigma = 0.9$ mm.

Kuntokriteerin pienimmäksi simulointiajaksi valittiin 21 vuotta ja lopetusrajaksi keskimääräiselle urasyvyydelle 8,5 millimetriä. Näillä arvoilla uutta päällystettä tehdään noin 20 kilometriä, eli osuus tulee päällystettyä laskennallisesti noin kahteen kertaan. Keskimääräinen urasyvyys jää lopussa lähelle simulointiajan keskiarvoa, eli osuus jää keskimääräiseen kuntoon. Simulointivuosien määrä asettuu näillä asetuksilla keskimäärin 24–26 vuoteen strategiasta riippuen. Iteraatioiden lukumäärä oli 10 000, jolla saavutettiin odotusarvojen estimaateille riittävä tarkkuus.

5.2.1 Homogeenisemmin urautuva tie

Toimenpide- ja homogeenisuusrajat

Taulukossa 8 on esitetty simulointituloksia LTA/MP-strategialla eri toimenpide- ja homogeenisuusrajoilla. AR-parametreina on käytetty homogeenisemmän urautumisen aiheuttavaa parametriparia $\phi = 0.7$ ja $\sigma = 0.6$ mm.

Perustapauksena vasemmanpuoleisessa sarakkeessa on käytetty toimenpiderajana 16 millimetriä ja homogeenisuusrajana 11 millimetriä. Muissa kolmessa sarakkeessa on nostettu millimetrillä joko homogeenisuusrajaa, toimenpiderajaa tai molempia.

Perustapauksessa peittoprosentti on keskimäärin 24 %, jota voidaan verrata PYRO-mallin (Mild ym., 2011) parametreihin. Perustapauksen peittoprosentti 24 on sama kuin PYRO-mallin osaverkolla AB 6 000 (KVL 3 000–6 000) uran suhteen. PYRO:n osaverkolla SMA 12 000 (KVL 6 000–12 000) peittoprosentti uran suhteen on noin 30. Nyt käytetty KVL 6 000 osuu näiden osaverkkojen väliin, joten peittoprosentti on perustapauksessa hieman matala.

Simulointi lähtee mallin rakenteesta johtuen liikkeelle kahden vuoden ikäisestä päällysteestä ja loppuu kuntokriteerin vuoksi lähelle keskimääräistä urasyvyyttä. Jotta päästään tarkastelemaan varsinaisia vuosikustannuksia, täytyy huomioda, että simulointi lähtee liikkeelle paremmasta kuntotilasta kuin mihin se päättyy. Luvun 3.3.6 kuvasta 9 nähdään, että LTA/MP-toimenpiteen jälkeen tie on KVL:n 6 000 tapauksessa 8–9 mm keskimääräisessä urasyvyydessä keskimäärin neljän vuoden kuluttua päällystyksestä. Koska simulointi lähtee liikkeelle kahden vuoden ikäisestä päällysteestä, saadaan siis kaksi ensimmäistä simulointivuotta (2–4 vuoden ikäinen päällyste) mallissa ikään kuin ilmaiseksi. Siispä oikea vuosikustannus saadaan laskemalla vuosikustannukset niin, että kokonaiskustannuksia ei jaeta kahdelle ensimmäiselle simulointivuodelle. Näin lasketut, todelliset vuosikustannukset ovat rivillä *korjattu vuosikustannus*. Säästöprosentti on laskettu vertaamalla näitä korjattuja vuosikustannuksia, ja vertailukohtana on vasemmanpuoleisessa sarakkeessa oleva perustapaus. Vuosikustannukset ovat tutkittavan osuuden vuosikustannuksia, eli tässä 10 kilometrin vuosikustannuksia.

Taulukko 8. Simuloinnin tuloksia homogeenisemmin urautuvalla tiellä LTA/MP-strategialla eri toimenpide- ja homogeenisuusrajoilla. KVL on 6 000, osuuden pituus 10 km, kuntokriteerin pienin simulointiaika 21 vuotta ja lopetusraja 8.5 mm. Säästöprosentti on laskettu verrattuna vasemmanpuoleisen sarakkeen kustannuksiin korjatun vuosikustannuksen perusteella.

AR-parametrit	$\varphi = 0.7$ $\sigma = 0.6$ mm	$\varphi = 0.7$ $\sigma = 0.6$ mm	$\varphi = 0.7$ $\sigma = 0.6$ mm	$\varphi = 0.7$ $\sigma = 0.6$ mm
Strategia	LTA/MP	LTA/MP	LTA/MP	LTA/MP
TP-raja	16 mm	16 mm	17 mm	17 mm
Homog.-raja	11 mm	12 mm	11 mm	12 mm
Simulointivuosien lkm. ka.	24.0	24.4	24.4	24.8
Ka. ura	8.3 mm	8.7 mm	8.6 mm	9.0 mm
Yli 15mm uria ka/max	1.0 % / 6 %	1.6 % / 8 %	2.5 % / 15 %	3.6 % / 16 %
Saumojen lkm ka/max	4 / 7	6 / 12	2 / 5	4 / 8
Ka. ura viim. vuonna	9.1 mm	9.1 mm	9.1 mm	9.1 mm
Yli 11 mm uria viim. vuonna	27 %	31 %	25 %	30 %
100 m kiertoaika min/ka/max	7 / 10.2 / 18	7 / 11.0 / 19	8 / 10.8 / 18	8 / 11.6 / 20
Ka. peittoprosentti	24 %	34 %	35 %	45 %
Päällystyskohteiden urasyv. ka.	13.9 mm	14.4 mm	14.3 mm	14.9 mm
Päällystysvuosia	8	11	6	8
Päällystyspituus	21.9 km	20.3 km	20.9 km	19.5 km
Päällystyskohteiden lkm	11	17	7	11
Ka. päällystyskohteen pituus	2.2 km	1.2 km	3.2 km	1.9 km
Vuosikustannus simulointiajalta	34 500 €	33 200 €	31 400 €	30 400 €
Korjattu vuosikustannus	37 600 €	36 200 €	34 200 €	33 100 €
Säästöprosentti	-	4 %	9 %	12 %

Taulukosta 8 huomataan, että nostettaessa millimetrirajoja keskimääräinen urasyvyys kasvaa maltillisesti. Myös huonokuntoisten, urasyvyydeltään yli 15 mm satametrinen osuus kasvaa, mutta varsinkin pelkkää homogeenisuusrajaa nostettaessa kasvu on melko pientä. Samalla keskimääräiset kiertoajat kasvavat noin vuodella riippuen millimetrirajoista ja peittoprosentit nousevat huomattavasti.

Simulaatio lähtee liikkeelle tilanteesta, jossa tiellä ei ole lainkaan saumoja. Perustapauksessa saumojen lukumäärä on simulointiaikana keskimäärin 4 ja maksimissaan keskimäärin 7. Päällystyskohteita on simulointiaikana keskimäärin 11 ja päällystystöitä tehdään keskimäärin 8 vuonna. Päällystyskohteen keskipituus on perustapauksessa 2.2 km.

Jos pelkkää homogeenisuusrajaa nostetaan millimetrillä, jäävät urasyvyydeltään 11–12 mm syvyiset satametriset kohteista pois. Niiden lisäksi jää pois myös urasyvyydeltään syvempiä satametrisiä kohteiden katketessa korkeamman homogeenisuusrajan vuoksi. Nämä seikat näkyvät kohteiden lyhenemisenä, joka johtaa kohteiden lukumäärän, toimenpidevuosien sekä saumojen määrän kasvuun.

Pelkkää toimenpiderajaa nostamalla päällystyskohteista tulee vastaavasti pidempiä, koska toimenpiderajan ja homogeenisuusrajan väliin mahtuu enemmän satametrisiä. Tämä näkyy myös kohteiden lukumäärän, toimenpidevuosien sekä saumojen määrän vähenemisenä.

Kun toimenpideraja nostetaan 17 millimetriin ja homogeenisuusraja 12 millimetriin, säilyy niiden välinen alue 5 millimetrinä. Tällöin kohdepituudet, kohteiden lukumäärä-

rät, päällystysvuosien lukumäärät sekä saumojen lukumäärät pysyvät suunnilleen samoina kuin perustapauksessa.

Rajoja nostamalla saatavat säästöprosentit ovat huomattavia. Jos homogeenisuusrajaa nostetaan ja toimenpideraja säilytetään samana, ei tielle pääse syntymään sen suurempia urasyvyyksiä kuin perustapauksessa, mutta haittapuolena on kohdepituuksien lyhentyminen. Tällöin tienkäyttäjille aiheutuu haittaa, kun tiellä tehdään useammin toimenpiteitä ja päällysteen kunto vaihtelee lyhyen matkan välein.

Toimenpiderajan nostaminen sallii tiellä suuremmat urasyvyydet, mikä saattaa heikentää liikenneturvallisuutta. Toisaalta etuna on kohdepituuden kasvaminen. Molempia rajoja samanaikaisesti nostettaessa tiellä sallitaan syvemmät urat, ja kohdepituuksien pysyvät suunnilleen ennallaan.

Toimenpide- ja homogeenisuusrajat eivät esiinny ainakaan näin tiukkoina todellisessa päällystysohjelmoinnissa. Niiden sijaan voidaan verrata tuloksissa päällystyskohteiden keskimääräistä urasyvyyttä. Taulukosta huomataan, että lisäämällä kohteiden keskimääräistä urasyvyyttä millimetrillä voidaan päästä jopa yli 10 prosentin säästöihin.

Väliaikaispaikkaukset

Tarkastellaan seuraavaksi väliaikaispaikkausten vaikutusta tilanteeseen. Simulointeja tehtiin eri toimenpiderajoilla ja paikkauksen kestoilla, mutta homogeenisuusrajaa ei muuteltu. Paikkaustarkasteluihin valittiin homogeenisuusrajaksi 11 millimetriä, mutta yhtä hyvin se olisi voinut olla 12 millimetriä. Tuloksia on esitetty taulukossa 9, jossa vertailukohdaksi on otettu taulukon 8 perustapaus. Kahdessa keskimmaisessä sarakkeessa paikan kestoikänä on 2 vuotta ja oikeanpuoleisessa 3 vuotta.

Paikkausta tehdään simulointiaikana keskimäärin noin 2.5–4.5 km riippuen millimetritasajoin, eli keskimäärin noin 100–170 m vuodessa. Paikkauksen hinnan ollessa 8 000 €/km liikkuu paikkauksen osuus keskimääräisistä vuosikustannuksesta 1 000 euron molemmin puolin.

Paikattuja satametrisiä on tiellä keskimäärin melko vähän eli 2–3 prosenttia. Kun väliaikaispaikattujen osuus on korkeimmillaan simulointiaikana, eli juuri ennen merkittävää uudelleenpäällystystä, on paikattujen osuus keskimäärin 13–24 prosenttia riippuen millimetritasajoin ja kestoista.

Taulukko 9. Simuloinnin tuloksia homogeenisemmin urautuvalla tiellä VAP-LTA/MP-strategialla eri toimenpide- ja homogeenisuusrajoilla sekä väliaikaispaikan kestoilla verrattuna perustapaukseen. KVL on 6000, osuuden pituus 10 km, kuntokriteerin pienin simulointiaika on 21 vuotta ja lopetusraja 8.5 mm. Säästöprosentti on laskettu verrattuna vasemmanpuoleisen sarakkeen kustannuksiin korjatun vuosikustannuksen perusteella.

AR-parametrit	$\varphi = 0.7$ $\sigma = 0.6$ mm	$\varphi = 0.7$ $\sigma = 0.6$ mm	$\varphi = 0.7$ $\sigma = 0.6$ mm	$\varphi = 0.7$ $\sigma = 0.6$ mm
Strategia	LTA/MP	VAP-LTA/MP	VAP-LTA/MP	VAP-LTA/MP
TP-raja	16 mm	16 mm	17 mm	17 mm
Homog.-raja	11 mm	11 mm	11 mm	11 mm
Paikan kestoikä	-	2 v	2 v	3 v
Simulointivuosien lkm. ka.	24.0	25.1	25.7	26.2
Ka. ura	8.3 mm	8.8 mm	9.2 mm	9.4 mm
Yli 15mm uria ka/max	1.0 % / 6 %	2.8 % / 16 %	5.8 % / 32 %	7.3 % / 36 %
Paikattujen osuus ka/max	-	1.9 % / 16 %	1.4 % / 13 %	2.9 % / 24 %
Saumojen lkm ka/max	4 / 7	2 / 3	1 / 2	1 / 2
Ka. ura viim. vuonna	9.1 mm	9.1 mm	9.1 mm	9.1 mm
Yli 11 mm uria viim. vuonna	27 %	20 %	17 %	15 %
Paikattujen osuus viim. vuonna	-	0.7 %	0.4 %	0.6 %
100 m kiertoaika min/ka/max	7 / 10.2 / 18	9 / 11.4 / 17	10 / 12.1 / 17	11 / 13.0 / 17
Ka. peittoprosentti	24 %	47 %	57 %	65 %
Paikkauskohteiden urasyv. ka.	-	16.4 mm	17.4 mm	17.4 mm
Päällystyskohteiden urasyv. ka.	13.9 mm	14.3 mm	14.9 mm	15.2 mm
Paikkausvuosia	-	8	6	7
Päällystysvuosia	8	5	4	3
Toimenpidevuosia	8	11	9	9
Paikkauspituus	-	3.5 km	2.6 km	4.4 km
Päällystyspituus	21.9 km	20.0 km	19.3 km	18.1 km
Paikkauskohteiden lkm	-	24	19	32
Päällystyskohteiden lkm	11	5	4	3
Ka. päällystyskohteiden pituus	2.2 km	4.6 km	5.8 km	6.7 km
Vuosikustannus simulointiajalta	34 500 €	29 600 €	27 400 €	25 600 €
Korjattu vuosikustannus	37 600 €	32 200 €	29 700 €	27 700 €
Säästöprosentti	-	14 %	21 %	26 %

Paikkaukset pidentävät keskimääräistä kiertoaikaa noin vuodella tai kahdella riippuen paikan kestoikästä, ja peittoprosentit nousevat huomattavasti. Paikkausten myötä keskimääräiset kohdepituudet kasvavat, jolloin kohteiden lukumäärät, päällystysvuosien määrät ja saumojen määrät vähenevät. Saumojen lukumääriin ei ole otettu mukaan paikkauksista aiheutuvia saumoja. Paikkauksia tehdään usein ja kohteet ovat lyhyitä. Jo pelkällä väliaikaispaikkauksella ilman millimetrirajojen muuttamista keskimääräinen kohdepituus kasvaa noin kaksikertaiseksi.

Paikkauksella ilman millimetrirajojen muuttamista on saavutettavissa keskimäärin lähes 15 prosentin säästö. Mikäli paikkaukset yhdistetään millimetrirajojen nostoon, nousee säästöprosentti edelleen. Ilman väliaikaispaikkausta voitiin saavuttaa noin 10 %:n säästö nostamalla päällystyskohteiden keskimääräistä urasyvyyttä. Lisäämällä tähän väliaikaispaikkaukset 2 vuoden kestoajalla nousee säästöprosentti noin 20 prosenttiin.

5.2.2 Hyvin epähomogeenisesti urautuva tie

Toimenpide- ja homogeenisuusrajat

AR-parametreilla $\phi = 0.8$ ja $\sigma = 0.9$ mm mallinnetaan hyvin epähomogeenisesti urautuvaa tietä. Taulukossa 10 on esitetty simulointituloksia LTA/MP-strategialla.

Taulukko 10. Simuloinnin tuloksia hyvin epähomogeenisesti urautuvalla tiellä LTA/MP-strategialla eri toimenpide- ja homogeenisuusrajoilla. KVL on 6 000, osuuden pituus 10 km, kuntokriteerin pienin simulointiaika 21 vuotta ja lopetusraja 8.5 mm. Säästöprosentti on laskettu verrattuna vasemmanpuoleisen sarakkeen kustannuksiin korjatun vuosikustannuksen perusteella.

AR-parametrit	$\phi = 0.8$ $\sigma = 0.9$ mm	$\phi = 0.8$ $\sigma = 0.9$ mm	$\phi = 0.8$ $\sigma = 0.9$ mm	$\phi = 0.8$ $\sigma = 0.9$ mm
Strategia	LTA/MP	LTA/MP	LTA/MP	LTA/MP
TP-raja	16 mm	16 mm	17 mm	17 mm
Homog.-raja	11 mm	12 mm	11 mm	12 mm
Simulointivuosien lkm. ka.	23.9	24.5	24.1	25
Ka. ura	8.3 mm	8.7 mm	8.6 mm	8.9 mm
Yli 15mm uria ka/max	1.4 % / 6 %	2 % / 7 %	3 % / 11 %	4.1 % / 13 %
Saumojen lkm ka/max	8 / 14	11 / 20	6 / 11	8 / 15
Ka. ura viim. vuonna	9.0 mm	9.0 mm	9.1 mm	9.1 mm
Yli 11 mm uria viim. vuonna	30 %	32 %	31 %	33 %
100 m kiertoaika min/ka/max	5 / 10.2 / 20	5 / 11.0 / 22	5 / 10.7 / 20	6 / 11.6 / 22
Ka. peittoprosentti	29 %	38 %	37 %	47 %
Päällystyskohteiden urasyv. ka.	13.9 mm	14.5 mm	14.4 mm	15.0 mm
Päällystysvuosia	13	15	10	13
Päällystyspituus	20.6 km	19.2 km	19.6 km	18.6 km
Päällystyskohteiden lkm	19	27	14	20
Ka. päällystyskohteen pituus	1.1 km	0.7 km	1.4 km	1.0 km
Vuosikustannus simulointiajalta	34 700 €	32 800 €	32 100 €	30 500 €
Korjattu vuosikustannus	37 900 €	35 700 €	35 000 €	33 200 €
Säästöprosentti	-	6 %	8 %	12 %

Epähomogeenisemmasta urautumisesta johtuen kohteet ovat nyt selvästi lyhyempiä, jolloin kohteita, päällystysvuosia ja saumojä on enemmän. Lyhimmat kiertoajat ovat lyhyempiä ja pisimmät pidempiä kuin homogeenisemmassa tapauksessa. Vuosikustannukset eivät juuri eroa homogeenisemmasta tapauksesta (taulukko 8). Päällystyskohteet ovat lyhyempiä, jolloin niillä on kalliimpi kilometrihintä. Toisaalta uutta päällystettä tehdään hieman vähemmän, mikä taas laskee vuosikustannuksia. Toimenpide- ja homogeenisuusrajojen muutoksilla on samanlaiset vaikutukset kuin homogeenisemmassa tapauksessa (taulukko 8), ja myös säästöprosentit ovat samaa luokkaa.

Väliaikaispaikkaukset

Taulukossa 11 on simuloinnin tuloksia väliaikaispaikkauksesta hyvin epähomogeenisesti urautuvalle tielle. Nytkin paikkaukset kasvattavat keskimääräisiä kohdepituuksia, jolloin kohteiden lukumäärät, päällystysvuosien määrät ja saumojen määrät vähenevät. Muutokset ovat suhteessa samaa luokkaa kuin homogeenisemmassa tapauksessa.

nessa (taulukko 9). Paikkausta käytetään hieman enemmän ja säästöprosentit ovat hieman matalampia.

Taulukko 11. Simuloinnin tuloksia hyvin epähomogeenisesti urautuvalla tiellä VAP-LTA/MP-strategialla eri toimenpide- ja homogeenisuusrajoilla sekä väliaikaispaikan kestoilla verrattuna perustapaukseen. Kuntokriteerin pienin simulointiaika on 21 vuotta ja lopetusraja 8.5 mm. Säästöprosentti on laskettu verrattuna vasemmanpuoleisen sarakkeen kustannuksiin korjattun vuosikustannuksen perusteella.

AR-parametrit	$\varphi = 0.8$ $\sigma = 0.9$ mm	$\varphi = 0.8$ $\sigma = 0.9$ mm	$\varphi = 0.8$ $\sigma = 0.9$ mm	$\varphi = 0.8$ $\sigma = 0.9$ mm
Strategia	LTA/MP	VAP-LTA/MP	VAP-LTA/MP	VAP-LTA/MP
TP-raja	16 mm	16 mm	17 mm	17 mm
Homog.-raja	11 mm	11 mm	11 mm	11 mm
Paikan kestoikä	-	2 v	2 v	3 v
Simulointivuosien lkm. ka.	23.9	24.3	24.7	25.0
Ka. ura	8.3 mm	8.7 mm	9.0 mm	9.2 mm
Yli 15mm uria ka/max	1.4 % / 6 %	2.7 % / 10 %	5.3 % / 19 %	6.3 % / 21 %
Paikattujen osuus ka/max	-	2.5 % / 12 %	1.9 % / 10 %	3.5 % / 17 %
Saumojen lkm ka/max	8 / 14	5 / 9	4 / 7	3 / 6
Ka. ura viim. vuonna	9.0 mm	9.1 mm	9.1 mm	9.1 mm
Yli 11 mm uria viim. vuonna	30 %	29 %	29 %	28 %
Paikattujen osuus viim. vuonna	-	2.0 %	1.3 %	1.9 %
100 m kiertoaika min/ka/max	5 / 10.2 / 20	6 / 11.3 / 21	7 / 11.9 / 21	8 / 12.4 / 21
Ka. peittoprosentti	29 %	46 %	52 %	58 %
Paikkauskohteiden urasyv. ka.	-	16.4 mm	17.4 mm	17.4 mm
Päällystyskohteiden urasyv. ka.	13.9 mm	14.0 mm	14.5 mm	14.6 mm
Paikkausvuosia	-	13	11	12
Päällystysvuosia	13	8	7	6
Toimenpidevuosia	13	16	15	15
Paikkauspituus	-	4.1 km	3.2 km	4.6 km
Päällystyspituus	20.6 km	18.5 km	17.9 km	17.2 km
Paikkauskohteiden lkm	-	31	24	35
Päällystyskohteiden lkm	19	11	9	7
Ka. päällystyskohteiden pituus	1.1 km	1.8 km	2.2 km	2.7 km
Vuosikustannus simulointiajalta	34 700 €	30 700 €	28 400 €	27 000 €
Korjattu vuosikustannus	37 900 €	33 500 €	30 900 €	29 300 €
Säästöprosentti	-	12 %	18 %	23 %

5.2.3 Liikennemäärän vaikutus tuloksiin

Simulointeja tehtiin myös keskimääräisillä vuorokausiliikenteillä 3 000 ja 9 000 AR-parametrien arvoilla $\varphi = 0.7$ ja $\sigma = 0.6$ mm, jotka mallintavat homogeenisemmin urautuvaa tietä. Kuntokriteerin lopetusraja keskimääräiselle urasyvyydelle pidettiin 8.5 millimetrissä ja pienintä simulointiaikaa säädettiin siten, että osuus tuli päällystettyä

keskimäärin noin kahteen kertaan. KVL:llä 3 000 pienintä simulointiaikaa siis pidentettiin ja KVL:llä 9 000 sitä lyhennettiin.

KVL:n pieneneminen 3 000 ajoneuvoon aiheuttaa seuraavaa: Kiertoajat kasvavat noin 50 %, ja kohdepituuudet lyhenevät LTA/MP-strategialla noin 25 % ja VAP-LTA/MP-strategialla noin 40 %. Kohdepituuuden lyheneminen aiheutuu siitä, että tie on uudelleenpäällistysten koittaessa epähomogeenisemmassa kunnossa. Peittoprosentit jäävät pienemmiksi varsinkin VAP-LTA/MP-strategialla. Väliaikaispaikkaa tehdään paikkakilometreinä laskettuna noin 20–30 % vähemmän, jolloin sitä on tiellä keskimäärin noin 1–1.5 % ja maksimissaan keskimäärin 7–12 % riippuen rajoista ja paikan kestosta.

KVL:n nostaminen 9 000:een aiheuttaa vastakkaisia muutoksia: Kiertoajat lyhenevät noin 20 %, ja kohdepituuudet kasvavat jopa 50 %. Suurimpien keskimääräisten kohdepituuksien kasvua rajoittaa ilmeisesti tutkittavan osuuden pituus, eli osuuden päät tulevat usein vastaan kohteita muodostettaessa. Peittoprosentit kasvavat VAP-LTA/MP-strategialla jopa lähelle 80 prosenttia. Väliaikaispaikkaa tehdään noin 30–40 % enemmän, jolloin sitä on tiellä keskimäärin noin 2.5–5.5 % ja maksimissaan keskimäärin 20–40 % riippuen rajoista ja paikan kestosta.

Millimetrirajojen muuttamisen vaikutukset tien keskimääräiseen urasyvyyteen sekä päällystyskohteiden urasyvyyteen eivät juuri riipu liikennemäärästä.

Taulukossa 12 on esitetty vuosikustannuksia ja vastaavia säästöprosentteja KVL:n arvoilla 3 000, 6000 ja 9 000 eri strategioilla sekä eri toimenpide- ja homogeenisuus-rajoilla. KVL:n 6000 luvut ovat olleet jo aikaisemmin esillä taulukoissa 8 ja 9.

Taulukko 12. Vuosikustannuksia ja säästöprosentteja eri strategioilla ja millimetrirajoilla KVL:n arvoilla 3 000, 6 000 ja 9000 homogeenisemmän urautumisen aiheuttavilla AR-parametreilla $\phi = 0.7$ ja $\sigma = 0.6$ mm.

Strategia	LTA/MP	LTA/MP	LTA/MP	LTA/MP	VAP-LTA/MP	VAP-LTA/MP	VAP-LTA/MP
TP-raja	16 mm	16 mm	17 mm	17 mm	16 mm	17 mm	17 mm
Homog. raja	11 mm	12 mm	11 mm	12 mm	11 mm	11 mm	11 mm
Paikan kesto	-	-	-	-	2 v	2 v	3 v
KVL 3000 Korj. vuosik.	27 000 €	25 500 €	24 800 €	23 400 €	24 400 €	22 600 €	21 600 €
Säästö-%	-	6 %	8 %	13 %	10 %	16 %	20 %
KVL 6000 Korj. vuosik.	37 600 €	36 200	34 200	33 100	32 200 €	29 700 €	27 700 €
Säästö-%	-	4 %	9 %	12 %	14 %	21 %	26 %
KVL 9000 Korj. vuosik.	47 100 €	45 900 €	42 700 €	42 000 €	38 400 €	35 600 €	33 300 €
Säästö-%	-	3 %	9 %	11 %	18 %	24 %	29 %

Taulukosta 12 huomataan, että vähäliikenteisemmällä tiellä homogeenisuusrajan nostamisesta saatavat säästöt ovat hieman suurempia kuin vilkkaammin liikennöidyllä tiellä. Vilkkaammin liikennöidyllä tiellä puolestaan paikkauksen käytöstä saadaan suuremmat säästöt kuin vähäliikenteisemmällä tiellä, mikä johtuu siitä, että paikan kestoikä suhteessa kiertoaikaan on pidempi. Paikkauksilla saatavia säästöjä ei voidaan vertailla suoraan eri liikennemäärien välillä, vaan paikkauksen kesto täytyy suhteuttaa liikennemäärään. Hieman yksinkertaistaen voi ajatella, että 3 vuoden kesto KVL:llä 3000 vastaisi 1 vuoden kesto KVL:llä 9000.

5.3 Osuus valtatieltä 25

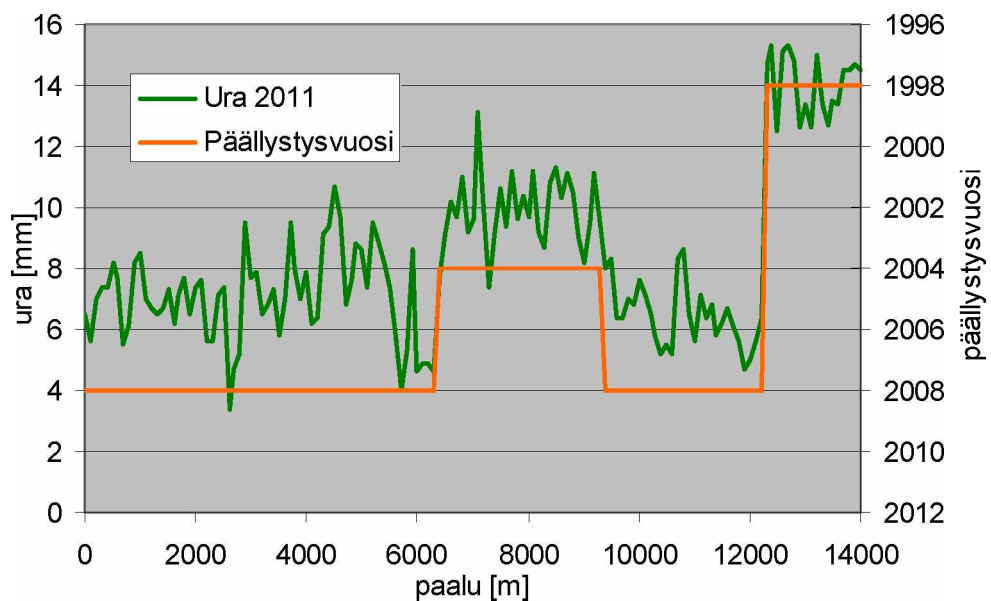
5.3.1 Tutkittava osuus

Generoidun lähtötilan lisäksi laskettiin tuloksia todelliselle tieosuudelle, joka sijaitsee Hanko–Mäntsälä valtatiellä (Mt 25). Kuvassa 26 on esitetty osuuden sijainti kartalla. Tutkittava osuus on pituudeltaan noin 14 km, ja se alkaa Mt 120 (Vihdintie/Vanha Porintie) risteyksestä ja jatkuu Mäntsälään päin. Osuus loppuu noin 1.5 km ennen Mt 132 (Keimola–Loppi) risteystä. Osuuden KVL on 4 842–5 283 ja nopeusrajoitus 80 tai 100 km/h kohdasta riippuen. Osuudella on eri-ikäistä päällystettyä, mutta kaikkialla viimeinen toimenpide on ollut REM.



Kuva 26. Tutkitavan valtatie 25 osuuden sijainti.

Osuuden vuoden 2011 uraprofiili (PMSPPro:n ennuste) sekä päällysteen ikä paaluluvun funktiona on esitetty kuvassa 27. Kuvasta nähdään yhteys urasyvyyden ja päällysteen iän välillä. Osuudella on kolme eri-ikäisen päällysteen saumakohtaa.



Kuva 27. Tutkittavan valtatie 25 osuuden uraprofiili (PMSPron ennuste vuodelle 2011) sekä päällysteen ikä paaluluvun funktiona.

Kuvasta 27 huomataan myös, että osuudella on rajua urasyvyyden vaihtelua aivan vierekkäistenkin satametrinen välillä, mikä näkyy kuvassa piikkeinä. Tämä lyhentää väistämättä toimenpidepitouksia, kun nopeimmin urautuvat kohdat ylittävät toimenpiderajan paljon yleistä tasoa nopeammin ja kohteet katkeavat homogeenisuusrajaan.

Osuudelle estimoitiin omat AR-parametrit. Paaluvälillä 0–6 400 m on pisin yhtenäinen osuus, ja se on päällystetty viimeksi vuonna 2008, eli päällyste oli kahden vuoden ikäistä vuonna 2010. AR-parametrit estimoitiin tämän yhtenäisen osuuden vuoden 2010 uramittaustuloksista, ja ne ovat $\phi = 0.48$ ja $\sigma = 0.90$ mm. Voimakas urasyvyyden vaihtelu peräkkäistenkin satametrinen välillä näkyy myös AR-parametreista. Peräkkäisten satametrinen urasyvyyksien riippuvuutta kuvaava parametri ϕ on melko pieni, ja kohinan keskihajonta σ on siihen verrattuna suuri.

Riskinä on, että parametrien estimointiin käytetyt 6 400 metriä eivät anna luotettavaa kuvaa koko osuuden urautumisesta seuraavien päällystystoimenpiteiden jälkeen. Tämä on hyvinkin mahdollista, sillä vaihtelua urautumisnopeuteen aiheuttaa muun muassa laadunvaihtelu päällysteessä, eikä tulevien päällystyskertojen laadusta voida sanoa vielä mitään. Siksi tuloksista ei voi tehdä varmoja päätelmiä kyseisen osuuden käyttäytymisestä tulevaisuudessa.

5.3.2 Simulointitulokset

Tehtäessä simulointeja valtatie 25 osuudelle pidettiin kuntokriteerin lopetusraja keskimääräiselle urasyvyydelle 8.5 millimetrissä. Käyttämällä pienimpänä simulointiaikana samaa kuin edellä KVL:lle 6 000, eli 21 vuotta, tehdään osuudelle uutta päällystettyä keskimäärin noin 28 km, eli se tulee päällystettyä laskennallisesti kahteen kertaan.

Toimenpide- ja homogeenisuusrajat

Taulukossa 13 on esitetty simuloinnin tuloksia LTA/MP-strategialla valtatie 25 osuudelle eri toimenpide- ja homogeenisuusrajoilla. Lähtötilan keskimääräinen urasyvyys on 8.4 mm, joka on hyvin lähellä lopputilan urasyvyyttä. Siispä vuosikustannuksia ei ole tarpeen tasoittaa edellisten laskelmien tapaan, vaan voidaan käyttää suoraan simulointimallin antamia vuosikustannuksia.

Taulukko 13. Simuloinnin tuloksia valtatie 25 osuudelle LTA/MP-strategialla eri toimenpide- ja homogeenisuusrajoilla. KVL on 4842–5283, osuuden pituus n. 14 km, kuntokriteerin pienin simulointiaika 21 vuotta ja lopetusraja 8.5 mm. Säästöprosentti on laskettu verrattuna vasemmanpuoleisen sarakkeen kustannuksiin.

AR-parametrit	$\varphi = 0.48$ $\sigma = 0.90$ mm	$\varphi = 0.48$ $\sigma = 0.90$ mm	$\varphi = 0.48$ $\sigma = 0.90$ mm	$\varphi = 0.48$ $\sigma = 0.90$ mm
Strategia	LTA/MP	LTA/MP	LTA/MP	LTA/MP
TP-raja	16 mm	16 mm	17 mm	17 mm
Homog.-raja	11 mm	12 mm	11 mm	12 mm
Simulointivuosien lkm. ka.	24.1	26.1	24.8	27.6
Ka. ura	8.6 mm	9.0 mm	8.9 mm	9.3 mm
Yli 15mm uria ka/max	2 % / 7 %	2.7 % / 8 %	4.1 % / 12 %	5.6 % / 13 %
Saumojen lkm ka/max	16 / 24	22 / 35	12 / 18	17 / 27
Ka. ura viim. vuonna	8.9 mm	8.9 mm	9.0 mm	9.0 mm
Yli 11 mm uria viim. vuonna	30 %	33 %	30 %	34 %
100 m kiertoaika min/ka/max	6 / 11.4 / 25	6 / 12.4 / 27	6 / 12.1 / 25	6 / 13.2 / 28
Ka. peittoprosentti	30 %	40 %	37 %	49 %
Päällystyskohteiden urasyv. ka.	14 mm	14.6 mm	14.4 mm	14.9 mm
Päällystysvuosia	17	21	13	19
Päällystyspituus	28.0 km	27.3 km	26.9 km	27.0 km
Päällystyskohteiden lkm	30	45	21	34
Ka. päällystyskohteen pituus	0.9 km	0.6 km	1.3 km	0.8 km
Vuosikustannus	47 000 €	44 300 €	43 200 €	40 700 €
Säästöprosentti	-	6 %	8 %	13 %

Taulukosta huomataan, että päällystyskohteet ovat keskimäärin huomattavan lyhyitä, jolloin päällystyskohteita, päällystysvuosia ja saumoja on paljon. Toimenpide- ja homogeenisuusrajojen muutosten vaikutukset ovat samansuuntaisia kuin generoitua lähtötilaa käyttäen lasketuissa tuloksissa. Säästöprosentit ovat hyvin lähellä epähomogeenisemmän urautumisen aiheuttavilla AR-parametreilla generoidulla lähtötilalla laskettuja tuloksia (taulukko 10).

Väliaikaispaikkaukset

Taulukossa 14 on esitetty simulointituloksia väliaikaispaikkauksesta valtatie 25 osuudelle. Väliaikaispaikkauksellakin keskimääräiset kohdepituuudet jäivät melko lyhyiksi, mutta toki ne pitenevät huomattavasti perustapaukseen nähden.

Taulukko 14. Simuloinnin tuloksia valtatie 25 osuudelle VAP-LTA/MP-strategialla eri toimenpide- ja homogeenisuusrajoilla sekä väliaikaispaikan kestoilla verrattuna perustapaukseen. KVL on 4842–5283, osuuden pituus n. 14 km, kuntokriteerin pienin simulointiaika 21 vuotta ja lopetusraja 8.5 mm. Säästöprosentti on laskettu verrattuna vasemmanpuoleisen sarakkeen kustannuksiin.

AR-parametrit	$\varphi = 0.48$ $\sigma = 0.90$ mm	$\varphi = 0.48$ $\sigma = 0.90$ mm	$\varphi = 0.48$ $\sigma = 0.90$ mm	$\varphi = 0.48$ $\sigma = 0.90$ mm
Strategia	LTA/MP	VAP-LTA/MP	VAP-LTA/MP	VAP-LTA/MP
TP-raja	16 mm	16 mm	17 mm	17 mm
Homog.-raja	11 mm	11 mm	11 mm	11 mm
Paikan kestoikä	-	2 v	2 v	3 v
Simulointivuosien lkm. ka.	24.1	25.1	26.1	26.8
Ka. ura	8.6 mm	9.0 mm	9.4 mm	9.5 mm
Yli 15mm uria ka/max	2 % / 7 %	3.2 % / 9 %	6.6 % / 16 %	7.4 % / 18 %
Paikattujen osuus ka/max	-	2.4 % / 9 %	1.7 % / 8 %	2.8 % / 11 %
Saumojen lkm ka/max	16 / 24	9 / 15	7 / 12	6 / 10
Ka. ura viim. vuonna	8.9 mm	9.0 mm	9.0 mm	9.0 mm
Yli 11 mm uria viim. vuonna	30 %	29 %	30 %	28 %
Paikattujen osuus viim. vuonna	-	1.9 %	1.3 %	2.2 %
100 m kiertoaika min/ka/max	6 / 11.4 / 25	7 / 12.6 / 26	7 / 13.5 / 25	8 / 14.1 / 26
Ka. peittoprosentti	30 %	45 %	53 %	56 %
Paikkauskohteiden urasyv. ka.	-	16.4 mm	17.3 mm	17.3 mm
Päällystyskohteiden urasyv. ka.	14.0 mm	13.9 mm	14.5 mm	14.5 mm
Paikkausvuosia	-	17	14	16
Päällystysvuosia	17	12	10	8
Toimenpidevuosia	17	20	18	19
Paikkauspituus	-	5.4 km	4.1 km	5.3 km
Päällystyspituus	28.0 km	25.9 km	25.2 km	24.8 km
Paikkauskohteiden lkm	-	46	36	46
Päällystyskohteiden lkm	30	17	13	11
Ka. päällystyskohteiden pituus	0.9 km	1.6 km	1.9 km	2.3 km
Vuosikustannus	47 000 €	42 100 €	38 400 €	36 600 €
Säästöprosentti	-	10 %	18 %	22 %

Paikkausta käytetään osuuden pituuteen nähden suunnilleen saman verran kuin generoidulla lähtötilalla lasketuissa tuloksissa. Nytkin säästöprosentit ovat hyvin lähellä epähomogeenisemmän urautumisen aiheuttavilla AR-parametreilla generoidulla lähtötilalla laskettuja tuloksia (taulukko 11).

5.4 Herkkyysanalyysit

Tässä tarkastellaan tulosten herkkyyttä parametrien muutoksille. AR-parametreina on pari $\varphi = 0.7$ ja $\sigma = 0.6$ mm ja KVL on 6 000, eli tässä tutkitaan miten taulukoiden 8 ja 9 tulokset muuttuvat vaihtamalla yhtä parametria kerrallaan.

Kahden vuoden ikäisen päällysteen urasyvyyden kohina

Tässä työssä on käytetty keskihajonnalle arvoa 0.2 (luku 3.3.6), joka asetettiin arvion perusteella. Tulosten herkkyyttä kyseiselle parametrille arvioitiin tekemällä simulointi arvoilla 0.1 ja 0.3. Erot tuloksissa ovat melko pieniä, ja suurin ero on päällystyspituudessa. Keskihajonnan nostaminen arvoon 0.3 lisää päällystyspituutta LTA/MP-strategioilla noin kilometrillä ja laskeminen arvoon 0.1 lyhentää sitä noin kilometrillä. Suuremmalla keskihajonnalla tiellä on enemmän erittäin nopeasti urautuvia osuuksia,

jotka laukaisevat päällystystoimenpiteen nopeasti, jolloin päällystyspituus kasvaa. VAP-LTA/MP-strategiassa tämä näkyy myös paikkauspituuden kasvuna.

Keskihajonnalla 0.3 paikkausta käytetään enemmän, jolloin VAP-LTA/MP-strategialla saatavat säästöprosentit kasvavat 1–2 prosenttiyksikköä ja keskihajonnalla 0.1 ne vastaavasti laskevat 1–2 prosenttiyksikköä.

Ennustemallin kohina

Tässä työssä käytettiin tämänkin kertoimen keskihajonnalle arvoa 0.2 (luku 3.2) ja tulosten herkkyyttä parametrin muutoksille arvioitiin tekemällä simuloinnit arvoilla 0.1 ja 0.3. Vaikutukset tuloksiin ovat vähäisiä ja taas suurin ero on päällystyspituudessa. Tässä pienempi keskihajonta lisää päällystyspituutta muutamilla sadoilla metreillä ja suurempi keskihajonta vastaavasti vähentää sitä. Säästöprosentit säilyvät ennallaan.

Minimiurasyvyyskorjaus

Minimiurasyvyyskorjauksen odotusarvona oli aiemmissa laskelmissa 3.5 millimetriä, ja tulosten herkkyyttä tälle parametrille tarkasteltiin kokeilemalla arvoja 3.0 mm ja 4.0 mm. Rajan nostaminen vähentää kaikkein hitaimmin urautuvia satametrisiä, jolloin päällystyspituudet kasvavat parillasadalla metrillä ja saumojen määrä vähenee keskimäärin yhdellä. Rajan laskemisella on vastaavat vaikutukset toiseen suuntaan. Säästöprosentit säilyvät molemmissa kokeiluissa käytännössä ennallaan.

Paikkauskustannukset

Paikkauskustannusten nostaminen pienentää luonnollisesti paikkauksella saatavia säästöjä, mutta koska paikkausten osuus kokonaiskustannuksista on melko pieni, vaikutus ei ole kovin suuri.

Jos paikkauskustannukset kaksinkertaistuvat 8 000 eurosta 16 000 euroon kilometritä, nousee 10 kilometrin osuudella paikkauskustannusten osuus keskimääräisistä vuosikustannuksista 2 000–3 000 euron paikkeille millimetrirajoista ja paikan kestoikästä riippuen. Tämä tarkoittaa noin 2–4 prosenttiyksikön pudotusta VAP-LTA/MP -strategian säästöprosentteihin.

Jos neliöhinta pidettäisiin ennallaan, tarkoittaisi paikkauskustannusten kaksinkertaistuminen sitä, että paikkausta tehtäisiin 400 m² paikattavaa satametristä kohden, eli kaikki neljä ajouraa paikattaisiin aina koko satametrisen pituudelta.

AR-parametrit

Aiemmin on käytetty pääasiassa AR-parametripareja $\phi = 0.7$ ja $\sigma = 0.6$ mm sekä $\phi = 0.8$ ja $\sigma = 0.9$ mm. Tässä kokeiltiin myös kahta muuta yhdistelmää, jotka olivat $\phi = 0.85$ ja $\sigma = 0.7$ mm sekä $\phi = 0.6$ ja $\sigma = 0.9$ mm. Ensimmäisessä parissa peräkkäisten satametrysten urasyvyyksien riippuvuutta kuvaava parametri ϕ on hyvin suuri ja kohinan keskihajonta siihen verrattuna melko pieni. Aineistosta estimoituja AR-mallin parametreja esittävässä luvun 3.3.2 taulukossa 2 tämänkaltaiset parametrit löytyvät tien 13 osuuden kohdalta. Jälkimmäisessä parissa ϕ on melko pieni ja σ siihen verrattuna suuri. Taulukossa 2 on useampiakin osuuksia, joiden parametrit ovat samantapaiset.

Simuloinnin tulokset näillä kahdella uudella parametriparilla ovat useimpien muuttujien suhteen aikaisempien parametriparien tulosten välistä tai sivuavat niitä. Kaksi

läpi työn käsittelyssä ollutta parametriparia valittiin siis sopivasti edustamaan eri tavoin urautuvia teitä.

Herkkyysanalyyseistä voidaan päätellä, että malli ei ole kovinkaan herkkä millekään parametrille lukuun ottamatta AR-mallin parametreja ja keskimääräistä vuorokausiliikennettä. Nämä parametrit kuvaavatkin erilaista urautumista, joten simulointeja tehtiin useammalla AR-mallin parametriparilla ja KVL:llä.

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Työssä tutkittiin toimenpiderajan ja homogeenisuusrajan nostamisen sekä väliaikaispaikkauksen käytön vaikutuksia ylläpitokustannuksiin ja päällysteen kuntoon urautuvalla tieverkolla. Tutkimus toteutettiin rakentamalla päällysteiden ylläpitoa mallintava simulointimalli.

Simulointimallia varten kehitettiin epähomogeenisia uraprofiileja tuottava urauttamismalli. Urauttamismallin toimintaa verifioitiin huolellisesti ja sen todettiin tuottavan todenmukaisia uraprofiileja.

Seuraavaksi rakennettiin simulointimalli, johon urauttamismalli implementoitiin. Ylläpitostrategiat muokattiin suoraviivaisiksi päätössäännöiksi, jotta ne saatiin ohjelmoitua malliin. Simulointimalli toteuttaa epähomogeenisesti urautuvalle tielle ylläpitotoimenpiteitä päätössääntöjen pohjalta. Simulointimalliin toteutettiin lopetusehdoksi kuntokriteeri, joka lopettaa simuloinnin määrättyyn keskimääräiseen urasyvyyteen. Kuntokriteerin avulla saadaan vertailukelpoisempaa tietoa strategioiden vuosikustannuksista kuin kiinteää simulointiaikaa käyttämällä.

Simulointimallilla laskettiin tuloksia niin generoitujen lähtöprofiilien kuin todellisenkin tieosuuden pohjalta. Sekä toimenpiteisiin liittyvien millimetrirajojen muutoksilla että väliaikaispaikkauksella on saavutettavissa huomattavia säästöjä vuosikustannuksiin. Nämä säästöt syntyvät päällysteiden kiertoaikojen kasvattamisesta eli uusimisvälin pidentämisestä. Lisäksi säästöjä tuo mahdollinen keskimääräisen kohdepituuden kasvaminen, sillä pidemmissä kohteissa päällystystyön yksikköhinta laskee.

Simulointitulosten perusteella voidaan todeta, että lisäämällä päällystyskohteiden keskimääräistä urasyvyyttä yhdellä millimetrillä voidaan saada keskimäärin noin 10 prosentin säästöt. Kohteiden urasyvyyttä voidaan lisätä nostamalla toimenpiderajoja tai ottamalla matalauraisia satametrisiä vähemmän mukaan kohteisiin, mikä simulointimallissa tehdään nostamalla homogeenisuusrajaa. Molempia rajoja voidaan nostaa myös samanaikaisesti.

Toimenpiderajojen nosto sallii tielle suuremmat urasyvyydet, mikä saattaa heikentää tien turvallisuutta ja ajomukavuutta. Toimenpiderajojen noston hyvänä puolena on keskimääräisen kohdepituuden kasvaminen, jolloin toimenpiteiden, toimenpidevuosien ja saumojen lukumäärät vähenevät, eli tie on yhtenäisemmässä kunnossa.

Mikäli matalauraisia satametrisiä otetaan kohteisiin mukaan vähemmän, eli nostetaan homogeenisuusrajaa, mutta pidetään toimenpideraja ennallaan, eivät suurimmat urasyvyydet kasva. Tämä on liikenneturvallisuuden ja ajomukavuuden kannalta positiivinen seikka. Keskimääräinen kohdepituus kuitenkin lyhenee, mikä johtaa toimenpiteiden, toimenpidevuosien ja saumojen määrän lisääntymiseen. Tällöin tienkäytännölle aiheutuu haittaa, koska tiellä tehdään useammin toimenpiteitä, ja lisäksi se on vaihtelevammassa kunnossa. Mikäli toimenpide- ja homogeenisuusrajoja nostetaan samalla kertaa yhtä paljon, sallitaan syvemmät urat keskimääräisen kohdepituuden säilyessä likimain ennallaan.

Pelkällä väliaikaispaikkauksella ilman millimetrirajojen muuttamista voidaan saada säästöä keskimäärin noin 15 prosenttia. Yhdistämällä kohteiden keskimääräisen urasyvyyden lisääminen ja väliaikaispaikkaus päästään keskimäärin noin 20 prosen-

tin säästöihin. Väliaikaispaikkauksella saatavien säästöjen määrä riippuu paikkauksen kestosta eli siitä, kauanko paikkaa voidaan pitää tiessä ennen varsinaista päällystystoimenpidettä. Vilkkaammin liikennöidyllä tiellä yhtä monen vuoden lykkäyksellä on enemmän vaikutusta keskimääräisiin vuosikustannuksiin kuin vähäliikenteisemmällä tiellä.

Myös paikkauksista aiheutuu haittaa tienkäyttäjille. Vaikka paikkauksella poistetaan vaarallisen syvät urasyvytydet, ei tulos kuitenkaan vastaa ajomukavuudeltaan uutta, yhtenäistä päällystettä. Simulointitulosten perusteella paikkoja on tiellä päällysteen elinkaaren aikana keskimäärin vähän; eniten niitä on varsinaista päällystystoimenpidettä edeltävänä vuonna. Jonkin verran haittaa aiheutuu myös itse paikkaustoimenpiteestä. Paikkauksen positiivinen puoli tienkäyttäjälle on keskimääräisen kohdepitouden kasvu, jolloin tie on varsinaisen uudelleenpäällystyksen jälkeen yhtenäisemmässä kunnossa. Paikkaus on mahdollista tehdä aina kaikkiin neljään uraan, jolloin paikkattu päällyste on ajomukavuudeltaan parempi. Tällöin säästöprosentit pienenevät muutamalla prosenttiyksiköllä.

Tässä työssä simulointeja tehtiin homogeenisemmin ja epähomogeenisemmin urautuville teille, eri liikennemäärille sekä myös todelliselle tieosuudelle, joka valittiin valtatietä 25. Esimerkiksi kiertoajat, päällystyskohteiden keskipituudet ja saumojen lukumäärät vaihtelivat voimakkaasti eri tavoin urautuvia teitä jäljittelevissä simulaatioissa. Säästöprosentit eri strategioilla eivät kuitenkaan poikkea toisistaan kovinkaan suuresti. Lisäksi todettiin, että malli ei ole erityisen herkkä sen muiden parametrien muutoksille.

Työn voidaan katsoa onnistuneen hyvin, sillä johdannossa esitetyt tavoitteet on saavutettu. Työssä on sovellettu uutta lähestymistapaa päällysteiden ylläpitostrategioiden tutkimiseen, ja se on tuottanut uusia työkaluja infrastruktuurin ylläpidon mallinustamailmaan. Ylläpitostrategioiden simulointien tuloksena on saatu tietoa toimenpiderajan ja homogeenisuusrajan nostamisen sekä väliaikaispaikkauksen käytön vaikutuksista ylläpitokustannuksiin ja päällysteen kuntoon.

Lähdeluettelo

Archilla, A., ja Madanat, S. (2000), *Development of a Pavement Rutting Model from Experimental Data*, Journal of Transportation Engineering, 126(4), ss. 291–299

Box, G. ja Müller, M. (1958), *A Note on the Generation of Random Normal Deviates*, Annals of Mathematical Statistics, 29(2), ss. 610–611

Box, G., Jenkins, G. ja Reinsel, G. (2008), *Time Series Analysis – Forecasting and Control*, Wiley, ISBN 978-0-470-27284-8, 4. painos

Brockwell, P. ja Davis, R. (2002), *Introduction to Time Series and Forecasting*, Springer, ISBN 0-387-95351-5, 2. painos

Chootinan, P., Chen, A., Horrocks, M. ja Bolling, D. (2006), *A Multi-year Pavement Maintenance Program Using a Stochastic Simulation-based Genetic Algorithm Approach*, Transportation Research Part A, 40, ss. 725–743

Fwa, T., Chan W., ja Hoque, K (2000), *Multiobjective Optimization for Pavement Maintenance Programming*, Journal of Transportation Engineering, 126(5), ss. 367–374

Heiniö, H. toim. (2010), *Tietilasto 2009, Liikenneviraston tilastoja 2/2010*, ISBN 978-952-255-008-8

Laininen, P. (2001), *Tilastollisen analyysin perusteet*, Otatieto 597, ISBN 951-672-308-X, 2. painos

Lampinen, A. (1993), *Kestopäällysteiden urautuminen*, väitöskirja, VTT Julkaisuja 781, ISBN 951-38-4129-4

Li, Y. ja Madanat (2002), S., *A Steady-state Solution for the Optimal Pavement Resurfacing Problem*, Transportation Research Part A, 36, ss. 525–535

Liikennevirasto (2010), *Liikenneviraston toiminta- ja taloussuunnitelma 2011–2014*, ISBN 978-952-255-002-6

Mild, P. ja Spoof, H. (2009), *Tienpäällystysurakoiden optimaalinen sisältö ja laajuus*, Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja 54/2009

Mild, P., Spoof, H. ja Junes, J. (2011), *Päällysteiden ylläpidon rahoitustarpeen optimointi – PYRO-malli*, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 7/2011, ISBN 978-952-255-620-2

Ouyang, Y. ja Madanat, S. (2004), *Optimal Scheduling of Rehabilitation Activities for Multiple Pavement Facilities: Exact and Approximate Solutions*, Transportation Research Part A, 38, ss. 347–365

Rantanen, T. ja Suikki, L. (2009), *Uusiopäällysteiden käyttö päällysteiden ylläpidossa*, Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja 56/2009

Shumway, R. (1988), *Applied Statistical Time Series Analysis*, Prentice-Hall, ISBN 0-13-040387-3

Spoof, H., Männistö, V., Lähde, V. ja Ruotoistenmäki, A. (2005), *PMSPro:n kuntoennustemallit 2004*, Tiehallinnon selvityksiä 9/2005, ISBN 951-803-458-3

Spoof, H. ja Männistö, V. (2008), *HTU pääteiden palvelusopimus 2007–2008, Pilottiraportti # 1, Pilotin valmistelu ja tarjousvaihe*, Tiehallinnon selvityksiä 5/2008, ISBN 978-952-221-021-0

Suonio, S. (2011), *Asfalttipäällysteiden alku-urautuminen*, diplomityö, Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulu, yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos, tietekniikka

TietoEnator Oyj (2005), *PMSPro versio 2.3 – käyttöohje*

Tiehallinto (40/2005), Asiantuntijapalvelut, *Ura- ja sivukaltevuustunnusluvun määrittäminen kuntovastuu-urakkaan*, Tiehallinnon selvityksiä 40/2005, ISBN 951-803-543-1

Tiehallinto (57/2005), Asiantuntijapalvelut, *Tieomaisuuden yhtenäinen kuntoluokitus*, Tiehallinnon selvityksiä 57/2005, ISBN 951-803-617-9

Tiehallinto (2009), *Päällysteiden paikkaus*, ISBN 978-952-221-262-7

Tielaitos (1998), Tiehallinto, tie- ja liikennetekniikka, *Päällysteiden suunnittelu*, 1998, ISBN 951-726-372-4

Yang, J., Lu, H. ja Zhu, H. (2009), *Approaches to Rut Depth Prediction in Semirigid Asphalt Pavements*, Journal of Engineering Mechanics, 135(6), ss. 510–516

Liikenneviraston ja Tiehallinnon julkaisut löytyvät pdf-muodossa Liikenneviraston kirjaston Finnralib -kokoelmatietokannasta osoitteesta
http://alk.tiehallinto.fi/kirjasto/haku_i_fin.htm.

